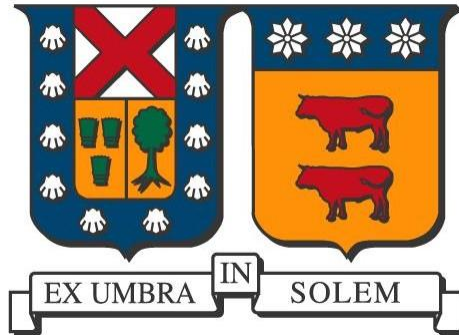


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS, METALURGIA Y
MATERIALES



OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD EN CHANCADORES MEDIANTE
LA APLICACIÓN DE UN FILTRO DE FINOS EN LA ALIMENTACIÓN

Ignacio Camacho Lolas

Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía
Francisca San Martín

Profesor Co-Guía
Alexander Ortiz

2026
Santiago, Chile



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD EN CHANCADORES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN FILTRO DE FINOS EN LA ALIMENTACIÓN

Nombre del candidato(a): Ignacio Rodrigo Sebastián Camacho Lolas

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas

Campus: San Joaquín **Departamento:** Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Francisca San Martin Robbiano, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 02/06/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 25/06/2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Al cerrar esta etapa fundamental de mi formación, quiero expresar mi gratitud a quienes fueron parte esencial de este camino, brindándome su apoyo, guía y compañía.

A mi familia, por ser el pilar inamovible de mi vida. A mis padres, por su amor incondicional y por haberme enseñado el valor del esfuerzo y la dedicación; este logro es tanto suyo como mío. A mis tíos, por su apoyo constante y por estar siempre presentes en los momentos importantes con una palabra de aliento.

A mi polola, por ser un gran apoyo durante este proceso. Gracias por tu paciencia infinita en los días de mayor presión, por tu motivación diaria y por ser el refugio donde siempre encontré tranquilidad para seguir adelante. Gracias por creer en mí, incluso cuando el camino se ponía difícil.

A mis compañeros de carrera, con quienes compartí la universidad. Gracias por las interminables jornadas de estudio, por los trabajos en equipo y por las discusiones técnicas que forjaron nuestro criterio profesional. Juntos enfrentamos los desafíos académicos y hoy celebramos el fin de esta etapa.

A mis amigos, por estar presentes fuera de las aulas. Gracias por los momentos de distracción, por las risas y por recordarme siempre la importancia del equilibrio. Su lealtad y apoyo han sido fundamentales para mantener la motivación y la alegría a lo largo de estos años.

Finalmente, agradezco a mis profesores guías por su orientación técnica y a la empresa Valteck por la confianza y los recursos otorgados para la realización de esta memoria.

Resumen

Esta memoria de título tiene como objetivo evaluar técnica y económicamente el impacto de incorporar una etapa de preclasificación de finos, mediante un Grizzly Feeder, previa a la alimentación del chancador primario en un circuito de conminución. En las operaciones mineras, el ingreso de material fino natural (ROM) a las cámaras de trituración genera el fenómeno de compactación (packing), lo que incrementa el desgaste de componentes, reduce la eficiencia energética y opera como un cuello de botella que limita la capacidad de tratamiento global de la planta.

La metodología de estudio se basó en el modelamiento fenomenológico y la simulación estacionaria del circuito utilizando el software JKSimMet 6.1, parametrizado con datos operacionales e industriales reales provistos por la empresa Valteck, además de literatura especializada. Se evaluaron secuencialmente escenarios comparativos para cuantificar el alivio operacional, balancear las cargas electromecánicas de los equipos y someter el circuito a una prueba de estrés para encontrar su capacidad máxima segura.

Los resultados de las simulaciones demostraron que el beneficio principal de la preclasificación es el aumento de la capacidad de tratamiento de la planta. El Grizzly Feeder con apertura de corte de 2 pulgadas desvía eficientemente un 34,5% del flujo nominal, eliminando el cuello de botella volumétrico del circuito. Al complementar esta holgura con el ajuste de la abertura de descarga (CSS) del chancador primario a 7 pulgadas, se logró un balance armónico de potencia entre los equipos que permitió incrementar la alimentación total de forma segura. La prueba de estrés confirmó que el circuito optimizado es capaz de procesar 1.150 TPH manteniendo los motores dentro de los rangos seguros de operación, lo que se traduce en un incremento neto del 15% en la productividad global. El indicador de mayor impacto para la rentabilidad de la operación. Como beneficio secundario, el proyecto demostró sustentabilidad energética al reducir el consumo específico de energía en un 7,1% (de 0,605 a 0,562 kWh/t) y evitar la emisión de 92,1 tCO₂eq por año, conservando la calidad granulométrica requerida para la molienda (P_{80} de 44,77 mm).

Desde la perspectiva financiera, la evaluación económica a nivel de perfil ratificó el impacto de esta estrategia. Con una Inversión de Capital (CAPEX) estimada en 1.575.000 USD, el incremento del tonelaje procesado genera un Beneficio Neto proyectado de 55.040.258 USD anuales. Se concluye que la preclasificación es una optimización altamente viable y estratégica para maximizar la rentabilidad operativa de la faena.

Palabras clave: chancado, eficiencia energética, preclasificación, productividad.

Abstract

This thesis aims to technically and economically evaluate the impact of incorporating a fines preclassification stage, using a Grizzly Feeder, prior to the primary crusher feed in a comminution circuit. In mining operations, the ingress of natural fine material (ROM) into crushing chambers causes the packing phenomenon, which increases component wear, reduces energy efficiency, and acts as a bottleneck that limits the plant's overall throughput.

The study methodology was based on phenomenological modeling and steady-state simulation of the circuit using JKSimMet 6.1, parameterized with operational and industrial data provided by the company Valteck, together with specialized literature. Sequential comparative scenarios were evaluated to quantify the operational relief, balance the electromechanical loads of the equipment, and subject the circuit to a stress test to determine its maximum safe capacity.

Simulation results demonstrated that the primary benefit of preclassification is a direct increase in plant throughput capacity. The Grizzly Feeder with a 2-inch cut size efficiently diverts 34.5% of the nominal flow, eliminating the volumetric bottleneck of the circuit. By complementing this relief with an adjustment of the primary crusher's closed-side setting (CSS) to 7 inches, a harmonic power balance between both machines was achieved, enabling safe throughput escalation. The stress test confirmed that the optimized circuit can process 1,150 TPH while keeping motors within safe operating margins, which translates into a net 15% increase in overall productivity — the highest-impact indicator for operational profitability. As a secondary benefit, the project demonstrated energy sustainability by reducing specific energy consumption by 7.1% (from 0.605 to 0.562 kWh/t) and avoiding 92.1 tCO₂eq per year in emissions, while preserving the granulometric quality required for milling (P80 = 44.77 mm).

From a financial perspective, the preliminary economic assessment confirmed the impact of this strategy. With a capital investment (CAPEX) estimated at USD 1,575,000, the increased processed tonnage generates a projected annual net benefit of USD 55,040,258. It is concluded that preclassification is a highly viable and strategic optimization to maximize the operational profitability of the site.

Keywords: crushing, energy efficiency, preclassification, productivity.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Planteamiento del problema.....	1
1.2.	Caso de Estudio.....	2
1.3.	Preguntas de investigación e hipótesis de trabajo.....	3
1.4.	Objetivos y alcances	3
1.4.1	Objetivo general.....	3
1.4.2	Objetivos específicos	3
1.4.3	Alcances	4
2.	Marco Teórico	5
2.1.	Conminución	5
2.2.	Teorías de la conminución.....	7
2.3.	Chancado.....	9
2.3.1	Dinámica de fractura en equipos de chancado.	10
2.3.2	Tipos de chancadores.....	11
2.3.3	Parámetros operacionales de los chancadores:.....	14
2.4.	Problema de los finos en el chancado.....	14
2.5.	Clasificación y precibado en chancado primario.....	15
2.5.1	Principios del precibado.....	16
2.5.2	Los fundamentos físicos del proceso de clasificación	16
2.5.3	Equipos de clasificación o precibado	17
2.5.4	Parámetros operacionales de diseño	19
2.6.	Simulación de procesos de conminución	21
2.6.1	Alcances de la simulación en minería.	21
2.6.2	Fundamentos Matemáticos de la Simulación	22
2.6.3	Principales herramientas de simulación:	24

2.6.4	Ejemplos recientes de la aplicación de la simulación de procesos de conminución:	25
2.7.	Impacto de la Preclasificación en la Productividad	25
2.8.	Fundamentos de Evaluación Económica en Proyectos	27
2.8.1	Inversión de Capital (CAPEX- <i>Capital Expenditure</i>):	27
2.8.2	Costos Operacionales (OPEX- <i>Operational Expenditure</i>):	28
2.8.3	Evaluación Económica Marginal y Beneficio por Productividad:.....	28
2.9.	Cierre marco teórico.....	29
3.	Metodología propuesta	30
3.1.	Recolección de datos y antecedentes	30
3.1.1	Datos Operacionales	30
3.1.2	Antecedentes Técnicos y Bibliográficos	31
3.1.3	Sistematización de la información	31
3.2.	Preparación de la base de datos y software computacional	32
3.2.1	Validación Datos Alimentación y Curva Granulométrica	32
3.2.2	Estandarización de Parámetros Operativos	34
3.3.	Estrategia de Simulación y Configuración de Escenarios	35
3.3.1	Escenario 1: Caso Base.....	35
3.3.2	Escenario 2: Caso Optimizado	36
3.3.3	Escenario 3: Ajuste de Parámetros Operativos – CSS	37
3.3.4	Escenario 4: Prueba de Estrés.....	38
3.3.5	Parametrización en el software	38
3.4.	Procesamiento y análisis de resultados	41
3.5.	Metodología de Evaluación Económica.....	42
3.5.1	Estimación de Capital (CAPEX)	42
3.5.2	Estimación de Parámetros Operacionales (OPEX)	43
3.5.3	Estimación de Beneficio.....	43
4.	Resultados.....	43

4.1.	Distribución Granulométrica de Alimentación	43
4.2.	Resultado Simulación Escenario1 (sin precibado)	44
4.3.	Resultado Simulación con Precibado (Grizzly a 2 pulgadas).....	46
4.4.	Resultado Simulación con Precibado (CSS a 7 pulgadas)	47
4.5.	Resultado Simulación con Precibado (Aumento Alimentación)	49
4.6.	Análisis Comparativo Global	51
4.7.	Evaluación Económica	52
4.7.1	Parámetros Económicos	52
4.7.2	Estimación CAPEX	53
4.7.3	Estimación OPEX Diferencial.....	53
4.7.4	Beneficio Marginal por Aumento de Productividad	54
4.8.	Análisis de Sensibilidad Geometalúrgica y Límites Operacionales	56
4.8.1	Fundamento Predictivo y Variabilidad Litológica	56
4.8.2	Resultados de Simulación frente a Estrés Geomecánico	56
4.8.3	Interpretación de Límites y Restricción Operativa	57
4.9.	Análisis de Sensibilidad de la Eficiencia de Precibado	58
4.9.1	Sensibilidad a la Eficiencia de Separación	58
4.9.2	Limitaciones del Modelo Computacional: El Efecto Packing	60
4.10.	Limitaciones Metodológicas del Estudio y Protocolo de Validación Futura	61
4.11.	Impacto Energético y Reducción de la Huella de Carbono	64
4.12.	Impacto Operacional: Reducción de OPEX por Menor Desgaste de Aceros	65
4.12.1	Estimación Económica Referencial de Ahorro en Aceros	66
4.13.	Impacto Operacional y Beneficios de la Preclasificación a Flujo Nominal Constante 67	
4.13.1	Erradicación del Mecanismo de Abrasión de Tres Cuerpos y Extensión de la Vida Útil de Revestimientos	68
4.13.2	Eliminación del Packing como Factor Mitigador de Picos Traccionales y Protección Electromecánica del Motor.....	69

4.14.	Limitaciones Fenomenológicas del Modelo Matricial y Tecnologías Avanzadas para la Simulación del Efecto Packing	71
4.14.1	Por qué el Modelo de Balance Poblacional Falla ante Cámaras Saturadas de Finos	71
4.14.2	El Método de Elementos Discretos (DEM) y su Acoplamiento con Dinámica Multicuerpo (MBD) como Solución al Estado del Arte	72
4.15.	Interpretación de los resultados	75
4.15.1	Alivio Operacional y Descongestión	75
4.15.2	Análisis Energetico y Electromecánico.....	75
4.15.3	Calidad de Producto P80	75
4.15.4	Límites de Capacidad y Cuello de botella	77
5.	Conclusiones	77
6.	Referencias	80
7.	Anexos	85
7.1.	Anexo 1: Cálculo de Energía Específica	85

Índice de figuras

Figura 2.1 "Mecanismos de fractura"	5
Figura 2.2 " Sección transversal chancador de mandíbula"	11
Figura 2.3 "Chancador giratorio: (a) diagrama funcional, (b) sección transversal.....	12
Figura 2.4 "Sección trasversal chancador de cono"	12
Figura 2.5 " Chancador de impacto"	13
Figura 2.6 "Grizzly Screen SG-H Sandvik"	18
Figura 2.7 " Lokotrack mobile screen".....	19
Figura 2.8 "Circuito de chancado con precibado y clasificación en múltiples etapas"	20
Figura 3.1 " Curva Granulométrica Alimentación"	34
Figura 3.2 "Escenario 1: Caso Base"	36
Figura 3.3"Escenario 2: Caso Optimizado"	37
Figura 3.4 "Configuración de Alimentación"	39
Figura 3.5 " Configuración Clasificador"	41
Figura 4.1 "Granulometría Alimentación"	44
Figura 4.2 "Resultados Escenario 1".....	45
Figura 4.3 "Resultados Escenario 2".....	46
Figura 4.4 "Resultados Escenario3".....	48
Figura 4.5 "Resultados Escenario 4".....	50
Figura 4.6 "Contraste fenomenológico en la cámara de trituración primaria: Supuesto de caída libre de finos vs. Empaquetamiento mecánico real"	60
Figura 7.1 " Resumen de la base de datos de ensayos geometalúrgicos por unidades M"	88

Índice de tablas

Tabla 2.1 "Tabla comparativa de las leyes clásicas de la conminución"	8
Tabla 2.2 "Tabla comparativa de chancadores"	13
Tabla 3.1 "Inventario de Datos y Fuentes"	31
Tabla 3.2 "Granulometría Alimentación"	32
Tabla 4.1 "Comparación Parámetros por Escenario"	51
Tabla 4.2 "Consumo de Potencia frente a Variabilidad Geometalúrgica"	57
Tabla 4.3 "Análisis de Sensibilidad a la Eficiencia Real de Preclasificación"	58
Tabla 7.1 "Valores por defecto para matriz de energía"	85
Tabla 7.2 "Matriz de t10 vs Ecs"	86
Tabla 7.3 "A x b vs Competencia mineral"	86

Índice de ecuaciones

Ecuación de Griffith (1)	6
Ley de Rittinger (2)	7
Ley de Kick (3).....	8
Ley de Bond (4)	8
Ley de Gaudin (5)	17
Modelo de Andersen & Whiten (6)	22
Función de Fractura y Energía (7)	23
Eficiencia de Separación (8)	23
Beneficio Marginal (9).....	28
OPEX Grizzly (10)	54
OPEX Chancado (11)	54
OPEX Diferencial (12).....	54
Delta de Producción (13)	54
Ingreso Marginal Bruto (14)	55
Beneficio Marginal Operacional (15).....	55
Beneficio Marginal Neto (16).....	55
Volumen Anual Procesado (17).....	65
Delta Energía (18)	65
Reducción Emisiones (19)	65
Masa Desviada (20).....	66
Acero Evitado (21)	67
Ahorro Acero (22)	67

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

En los procesos de conminución de minerales, el chancado cumple un rol crítico al reducir el tamaño del material extraído desde la mina y prepararlo para etapas posteriores como la molienda y la flotación (Wills & Napier-Munn, 2006). La presencia excesiva de partículas finas en la alimentación del chancador primario genera problemas operacionales como el packing (compactación), reducción de la capacidad de tratamiento, menor eficiencia energética, mayor desgaste de componentes y aumento del riesgo de detenciones no programadas (Fladvad & Onnela, 2020).

El exceso de finos también impacta en la sostenibilidad de la operación, ya que incrementa el consumo energético, acelera el recambio de revestimientos y limita la productividad efectiva del circuito, ya que ocupan capacidad instalada sin aportar a la reducción de tamaño. Por ello, la remoción de este material mediante preclasificación o precibado previo al chancado se ha posicionado como una estrategia eficiente para mejorar el rendimiento de los equipos y optimizar la productividad del circuito (Ramli et al, 2019; Cleary et al., 2017).

Fabricantes y estudios especializados coinciden en que la preclasificación libera capacidad instalada al reducir la fracción de material que no contribuye a la fragmentación efectiva, lo que se traduce en menor consumo energético, mayor vida útil de los equipos y estabilidad operacional (Metso, 2023; Weir, 2023). Desde una perspectiva de responsabilidad social y ambiental, implementar mejoras técnicas que optimicen el uso de equipos existentes también contribuye a reducir la huella energética, disminuir costos de mantenimiento y extender la vida útil de activos mineros críticos, alineándose con las metas de eficiencia y sostenibilidad de la industria actual.

En este contexto, surge la hipótesis de que la incorporación de un sistema de preclasificación en la alimentación del chancador primario permite mejorar significativamente la productividad, al reducir la carga innecesaria de finos desviándolos directamente al producto final de la etapa. Liberando capacidad instalada en la cámara de trituración, permitiendo un mayor flujo de alimentación, lo que se traduce en un incremento directo en la productividad y una mejora en el desempeño energético del proceso.

1.2. Caso de Estudio

El presente estudio aborda una de las restricciones operacionales más transversales en el procesamiento de minerales a nivel industrial: la penalización de la capacidad en la etapa de chancado primario debido a la alta concentración de material fino en la alimentación (ROM). Para desarrollar una metodología de optimización que sea replicable y escalable a diversas faenas de la gran minería, esta memoria establece como base de análisis un circuito de conminución con una capacidad nominal de diseño de 1.000 toneladas por hora (tph).

Para otorgar validez industrial a la simulación, el perfil granulométrico utilizado como caso base (*Quarry Shot*) se fundamenta en datos empíricos extraídos de Minera Los Pelambres. Este perfil evidencia un comportamiento representativo de múltiples yacimientos mineros, donde un porcentaje significativo del flujo másico ingresa a la planta con un tamaño que ya cumple los requerimientos de etapas posteriores. Específicamente, los datos base establecen que en una alimentación estándar de 1.000 tph, más de un 40% del material posee un tamaño inferior a 2 pulgadas. En un circuito primario tradicional de configuración abierta, la introducción forzada de esta fracción fina a la cámara de trituración genera el fenómeno de compactación (*packing*), lo cual incrementa drásticamente los requerimientos de potencia neta del motor, acelera el desgaste de los revestimientos y reduce el tonelaje efectivo que la máquina puede procesar.

Frente a este diagnóstico transversal en la industria, el estudio plantea evaluar técnica y económicamente la implementación de una etapa de preclasificación (*pre-screening*) como una solución estándar de optimización. Mediante la incorporación de un equipo vibratorio robusto tipo *Grizzly Feeder* previo al chancador, el objetivo es desviar la fracción de mineral fino hacia el flujo de producto final. Utilizando el software de modelamiento matemático JKSimMet, se busca cuantificar cómo la remoción de este material incompresible alivia mecánicamente al chancador primario, mejora la eficiencia energética global del circuito y entrega un tamaño de producto (P_{80}) más favorable para las etapas de conminución secundarias. De este modo, los resultados obtenidos en el escenario de 1.000 tph conformarán un marco de referencia aplicable a operaciones mineras que busquen maximizar su capacidad instalada y sostenibilidad operativa.

1.3. Preguntas de investigación e hipótesis de trabajo

¿Cómo influye el contenido de partículas finas en la alimentación del chancador primario sobre su rendimiento operativo y eficiencia energética?

¿Es posible aumentar la productividad del circuito de chancado mediante la aplicación de un sistema de preclasificación antes de la trituración primaria?

¿Qué impacto tendría esta modificación en términos de consumo energético y condiciones operacionales del equipo?

Hipótesis: La implementación de sistema de preclasificación previo a la etapa de alimentación de los chancadores permitirá incrementar la productividad, al reducir la carga innecesaria de finos, optimizar la fragmentación efectiva y disminuir el consumo energético.

1.4. Objetivos y alcances

1.4.1 Objetivo general

Evaluar técnica y económicamente el impacto de implementar una etapa de preclasificación en el circuito de chancado primario mediante modelamiento en software especializado, con el propósito de maximizar la capacidad de tratamiento (TPH) de la planta y optimizar la eficiencia global del proceso, cuantificando la holgura operativa generada en las cámaras de trituración para incrementar el tonelaje total procesado sin castigar la granulometría del producto final

1.4.2 Objetivos específicos

Analizar la influencia del contenido de finos en la alimentación sobre la productividad del chancador primario.

Cuantificar el efecto del precibado en indicadores clave como liberación de capacidad instalada, tonelaje procesado (TPH), consumo específico de energía (kWh/t) y granulometría del producto (P_{80}), mediante simulaciones computacionales.

Determinar el límite de productividad máxima del circuito optimizado mediante pruebas de estrés operacional en el simulador, incrementando la tasa de alimentación.

Evaluar la viabilidad económica del proyecto a través de un análisis costo-beneficio marginal, contrastando la estimación de CAPEX y OPEX del *Grizzly Feeder* frente a los ingresos adicionales proyectados por el aumento sostenido en el tonelaje procesado.

1.4.3 Alcances

El estudio se centra en el análisis técnico del circuito de chancado primario mediante simulaciones computacionales. Se consideran como variables de evaluación la productividad, la eficiencia energética y la granulometría del producto final combinado. En este contexto se definen las siguientes fronteras y límites metodológicos que enmarcan la investigación:

- Límite Computacional y de modelamiento: El análisis del circuito de conminución se realiza de forma exclusiva a través de simulación estática utilizando el software JKSimMet. No se contempla ejecución de pruebas metalúrgicas ni ensayos de laboratorio; los parámetros de fractura y caracterización del mineral son asumidos de manera conservadora basándose en la bibliografía técnica para yacimientos tipo pórfido cuprífero.
- Fronteras del Circuito Estudiado: El modelamiento de flujos e impacto granulométrico abarca estrictamente desde la alimentación del material *Run-of-Mine* (ROM) proveniente de la mina, pasando por la etapa de clasificación propuesta, el chancador primario y finalizando en el producto de descarga del chancador secundario de cono. El estudio de impacto aguas abajo no incluye la simulación de etapas terciarias, molienda ni procesos de concentración.
- Condiciones Operacionales: Se asume una condición de operación nominal y constante. El modelo no evalúa perturbaciones dinámicas en tiempo real, desgaste progresivo de los revestimientos ni variaciones diarias extremas en la dureza o reología del mineral.
- Nivel de Evaluación Económica: El análisis financiero corresponde a una evaluación a nivel de perfil, se estima la diferencia entre los ingresos proyectados por el aumento de la productividad frente a los costos directos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX) del nuevo equipo clasificador. Este alcance no constituye un estudio de viabilidad bancario, por lo que excluye ingenierías de detalle, diseño estructural de planta, cálculos de depreciación compleja o variables macroeconómicas dinámicas.

2. Marco Teórico

2.1. Conminución

La conminución corresponde al conjunto de operaciones destinadas a la reducción de tamaño de los minerales extraídos desde la mina, con el objetivo de liberar las especies valiosas y preparar el material para etapas posteriores de concentración. Se trata de una de las etapas más intensivas en consumo energético dentro del procesamiento mineral, ya que menos de un 10% de la energía suministrada se utiliza directamente en la fractura de partículas, mientras que el resto se disipa en forma de calor, fricción, ruido y deformaciones (King, 2012; Wills & Napier-Munn, 2006).

Desde un punto de vista físico, la conminución se basa en diferentes mecanismos de fractura, que dependen tanto del diseño de los equipos como de la naturaleza del mineral:

- Abrasión: corresponden al desgaste progresivo de las partículas por fricción y roce entre ellas o contra superficies duras. Este mecanismo es común en etapas de molienda fina, donde se reduce el tamaño por roce continuo.
- Compresión: ocurre cuando la partícula es atrapada entre dos superficies opuestas y se rompe por esfuerzos compresivos. Es el mecanismo dominante en chancadores de mandíbula, giratorios y de cono.
- Impacto: se produce cuando las partículas son aceleradas y chocan con superficies duras o entre sí, generando fractura por choque. Es típico en chancadores de martillo y molinos de impacto.

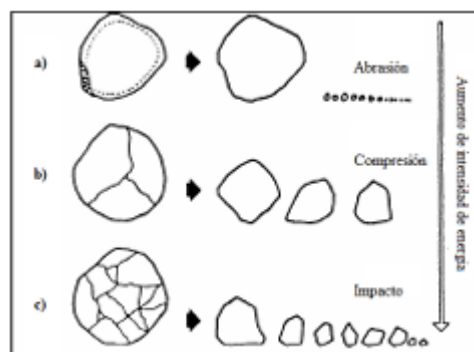


Figura 2.1 "Mecanismos de fractura"

Más allá de los mecanismos básicos, la fractura de rocas en equipos de conminución se explica fundamentalmente mediante la Teoría de Griffith (1921). Esta teoría postula que la rotura de materiales frágiles, como los minerales, no se debe a una falla simultánea de todos los enlaces atómicos, sino a la propagación inestable de microgrietas preexistentes en la estructura rocosa.

La condición crítica de tensión (σ_c) necesaria para que una grieta de longitud $2c$ se propague y fracture la partícula está dada por la relación energética:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}} \quad (1)$$

Donde:

- σ_c : Esfuerzo crítico de tensión.
- E : Módulo de Young (representa la rigidez del mineral).
- γ : Energía superficial específica (resistencia a crear nueva superficie).
- c : Longitud media de la microgrieta.

Esta ecuación es clave para entender el chancado primario: explica por qué las colpas de gran tamaño (con grietas internas más largas, mayor c) requieren proporcionalmente menor esfuerzo para fracturarse que las partículas pequeñas, justificando la eficiencia de aplicar fuerzas de compresión en etapas primarias.

La respuesta del mineral a la conminución depende de factores como su dureza, tenacidad, microestructura cristalina y la presencia de microgrietas. Minerales con elevada heterogeneidad mineralógica tienden a fracturarse más fácilmente debido a la existencia de interfaces débiles, mientras que materiales homogéneos y compactos requieren mayor energía específica (Napier-Munn et al., 1996)

En la práctica, el comportamiento global de la reducción de tamaño en una planta se describe a través de modelos de balance poblacional, los cuales consideran la distribución de tamaños en la alimentación, la probabilidad de ruptura de partículas y la generación de nuevos tamaños tras la fragmentación. Estos modelos permiten predecir la eficiencia de un circuito de conminución y ajustar parámetros operacionales para optimizar la productividad (King, 2012).

En términos operacionales, la conminución se divide en dos grandes etapas:

- Chancado, que reduce el tamaño del mineral grueso (*Run of Mine*) hasta un rango que permita su tratamiento en molinos.
- Molienda, donde se alcanzan tamaños mucho más finos, adecuados para la liberación y concentración de minerales valiosos.

El rendimiento global del procesamiento de minerales depende fuertemente de esta etapa inicial, por lo que optimizar la conminución constituye una estrategia clave para mejorar tanto la eficiencia energética como la productividad de la planta.

2.2. Teorías de la conminución

El estudio de la relación entre la energía aplicada y la reducción de tamaño lograda ha sido abordado históricamente a través de diversas teorías empíricas, denominadas comúnmente como leyes de la conminución. Estas permiten estimar, de manera aproximada, el consumo energético asociado a los procesos de chancado y molienda, siendo una herramienta clave para el diseño y la evaluación de circuitos industriales.

La ley de Rittinger, propuesta a mediados del siglo XIX, establece que la energía requerida es proporcional al aumento de superficie generada durante la conminución. Su validez es mayor en procesos de molienda fina, donde la superficie específica del material aumenta significativamente.

$$E_R = K_R \left(\frac{1}{P_{80}} - \frac{1}{F_{80}} \right) \quad (2)$$

Donde E_R corresponde a la energía específica de acuerdo con la teoría de Rittinger, F_{80} y P_{80} (μm , micrones) corresponden al tamaño de partícula del 80% del pasante acumulado en la alimentación y producto respectivamente y K_R corresponde a la constante de Rittinger.

La ley de Kick, también formulada en el siglo XIX, establece que la energía requerida es proporcional al logaritmo de la relación de reducción, en otras palabras, la ley de Kick establece que la energía necesaria para romper las partículas depende de la proporción entre los tamaños de mineral, sin considerar el área superficial generada. Resulta más adecuada para etapas de trituración gruesa, donde los cambios en superficie específica son menos relevantes.

$$E_K = K_K \log\left(\frac{F_{80}}{P_{80}}\right) \quad (3)$$

Donde E_K corresponde a la energía específica, F_{80} y P_{80} (μm , micrones) corresponden al tamaño de partícula del 80% del pasante acumulado en la alimentación y producto respectivamente y K_K es la constante de Kick.

Por último, la ley de Bond, también conocida como la tercera ley de la conminución, plantea que la energía requerida para reducir el tamaño de un mineral es proporcional a la diferencia entre los inversos de las raíces cuadradas de los tamaños iniciales y finales de las partículas, a diferencia de las leyes anteriores, la ley de Bond introduce el concepto de índice de trabajo (Work Index, W_i), un parámetro que representa la energía necesaria para triturar una tonelada corta de material desde un tamaño infinito hasta una malla de referencia de 100 micrones. Este índice varía según el tipo de material y debe determinarse mediante pruebas estandarizadas en laboratorio. La ley de Bond ha sido ampliamente utilizada debido a su capacidad de ofrecer estimaciones más realistas del consumo energético en operaciones de chancado y molienda de tamaño intermedio.

$$E_B = 10 \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{P_{80}} - \frac{1}{F_{80}}\right) \quad (4)$$

La comparación entre estas teorías evidencia que cada ley se ajusta mejor a distintos rangos de tamaño de partícula: Rittinger en molienda fina, Kick en trituración gruesa y Bond en conminución intermedia. Sin embargo, todas ellas presentan limitaciones, al basarse en suposiciones simplificadas que no consideran la naturaleza heterogénea de los minerales ni los fenómenos dinámicos dentro de los equipos.

Tabla 2.1 "Tabla comparativa de las leyes clásicas de la conminución"

Ley	Fundamento	Aplicación
Rittinger	Energía proporcional al área superficial	Procesos de molienda fina
Kick	Energía proporcional a la relación de reducción de tamaño	Trituración gruesa (etapas primarias)
Bond	Introduce el índice de trabajo (W_i); energía proporcional a diferencia de inverso de raíces	Trituración intermedia y molienda

En décadas más recientes, se han desarrollado enfoques alternativos como la ley de Charles, que propone relaciones energéticas más flexibles, y modelos basados en la fractomecánica, los cuales incorporan propiedades microestructurales de los minerales. Asimismo, el avance de la simulación computacional ha permitido el uso de métodos como el Elemento Discreto (DEM), que representan de manera más realista la distribución de esfuerzos y los mecanismos de fractura en equipos de conminución (Cleary *et al.*, 2017).

En conclusión, las leyes clásicas siguen siendo una referencia fundamental para la estimación preliminar de consumos energéticos, aunque en la práctica se complementan con métodos empíricos, simulaciones y pruebas de laboratorio que permiten una caracterización más precisa del comportamiento real de cada mineral en los circuitos de reducción de tamaño.

2.3. Chancado

El chancado representa la etapa inicial en el proceso de conminución de minerales, cuyo propósito es reducir el tamaño del material proveniente del yacimiento hasta una dimensión adecuada para la molienda. Esta reducción de tamaño puede realizarse en una o varias fases, dependiendo de la dureza del mineral, del tamaño de las colpas y del tamaño requerido para el proceso posterior.

El material extraído desde la mina, en su forma ROM (Run Of Mine), suele presentar tamaños irregulares por lo que es necesario un proceso inicial de fragmentación que garantice una alimentación adecuada para las siguientes etapas. Esta etapa cumple una función clave no solo por razones operativas, sino que también económicas, ya que una correcta preparación del mineral permite maximizar la eficiencia energética y reducir el desgaste de los equipos aguas abajo en el circuito de procesamiento.

Según las características del material y las metas del proceso, el chancado puede dividirse en etapas primaria, secundaria, terciaria e incluso cuaternaria, cada una con equipos específicos que operan bajo principios de compresión o impacto para alcanzar los tamaños deseados.

En términos generales, el chancado se clasifica en primario, secundario, terciario y cuaternario, dependiendo del grado de reducción requerido y de la dureza del mineral procesado. El chancado primario busca reducir colpas de gran tamaño (hasta 1–1,5 m) a un rango cercano a 15–20 cm, mientras que las etapas posteriores se encargan de alcanzar tamaños más finos, generalmente menores a 1 cm, adecuados para la alimentación a molinos SAG o de bolas.

En etapas primarias se utilizan principalmente dos tipos de chancadores: los giratorios y los de mandíbulas. La elección entre uno u otro dependerá de aspectos como la granulometría del mineral de la alimentación, la capacidad requerida, el espacio disponible y las condiciones de operación. Los chancadores de mandíbulas suelen preferirse en instalaciones subterráneas o de tamaño reducido por su estructura más compacta y su facilidad de mantenimiento.

2.3.1 Dinámica de fractura en equipos de chancado.

Independientemente del tipo de equipo (mandíbula, giratorio o cono), la fragmentación de la roca dentro de la cámara de trituración no ocurre mediante un único mecanismo simple, sino a través de una compleja interacción de fuerzas que determinan la eficiencia del proceso. Aunque el principio de diseño se basa en la compresión, la física de la fractura operativa involucra los tres fenómenos dinámicos principales y cada uno se comporta como se describe a continuación dentro del chancador:

1. **Fractura por Tensión Inducida:** En equipos de compresión, la roca falla paradójicamente por tensión. Cuando una colpa es comprimida entre dos superficies (sea la mandíbula fija y móvil, o el manto y el cóncavo), el mineral experimenta una expansión lateral debido al Efecto Poisson. Esto genera grietas de tracción internas paralelas a la dirección de la carga aplicada. Dado que la resistencia a la tracción de la roca es aproximadamente 1/10 de su resistencia a la compresión, este es el mecanismo energéticamente más eficiente para lograr la reducción de tamaño.
2. **Esfuerzos de Cizalle:** Debido a la geometría de la cámara y al movimiento excéntrico de los componentes móviles, las fuerzas de compresión rara vez se aplican de manera perfectamente perpendicular a la superficie de la roca. Esto genera componentes vectoriales de fuerza tangencial o de corte. Si bien el cizalle contribuye a la desintegración del material, es también el principal causante del desgaste abrasivo en los revestimientos del chancador, ya que promueve el deslizamiento de la roca bajo presión contra el acero.
3. **Fractura Inter partícula:** En condiciones operativas reales, especialmente cuando la cámara está llena, las rocas no solo interactúan con las superficies metálicas del equipo, sino también entre ellas. Las colpas grandes transmiten fuerzas puntuales a las partículas más pequeñas que las rodean. Sin embargo, si la alimentación contiene un exceso de finos, estos actúan como un “colchón” amortiguador que disipa la energía de trituración en forma de compactación (*packing*) en lugar de fractura efectiva, reduciendo la eficiencia del equipo.

2.3.2 Tipos de chancadores.

Chancador de Mandíbulas: está formado por dos superficies de acero, una fija y otra móvil, dispuestas en forma de "V". la mandíbula móvil se mueve hacia adelante y hacia atrás de manera oscilante, aplastando el material contra la mandíbula fija. Este movimiento permite fragmentar el material progresivamente hasta alcanzar un tamaño que pueda ser descargado por la parte inferior del equipo. Esta abertura de descarga es conocida como "setting" y determina el tamaño máximo del producto final. Este tipo de chancadores se caracteriza por poder ser alimentado con colpas de gran tamaño, su robustez y versatilidad.

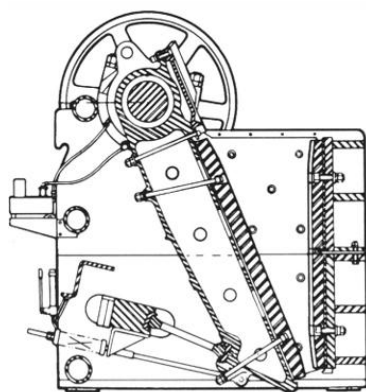


Figura 2.2 " Sección transversal chancador de mandíbula"

Chancador giratorio: es el equipo más utilizado en plantas de gran capacidad para la etapa de chancado primario, debido a su robustez y elevada productividad. Está compuesto por un eje central cónico que gira de manera excéntrica dentro de una carcasa cilíndrica, generando un movimiento de compresión continua sobre el material. A diferencia del chancador de mandíbulas, donde la trituración ocurre en un punto específico del ciclo oscilante, en el giratorio el contacto es prácticamente constante, lo que permite un flujo más uniforme y una mayor capacidad de procesamiento (hasta 10.000 TPH en instalaciones de gran escala).

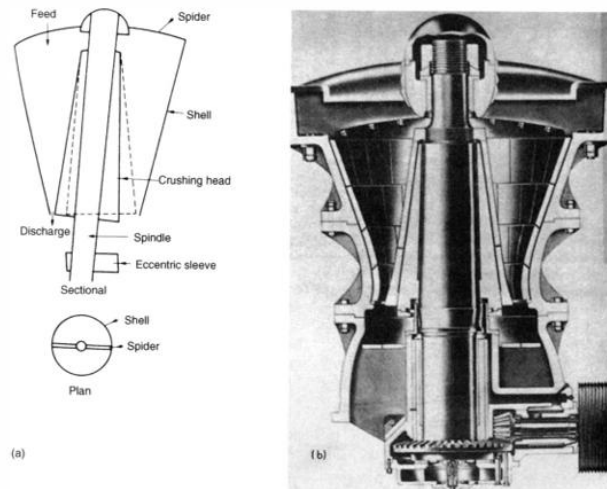


Figura 2.3 "Chancador giratorio: (a) diagrama funcional, (b) sección transversal

Chancador de cono: es un equipo ampliamente utilizado en las etapas de chancado secundario y terciario en plantas de tratamiento de mineral. Su principio de funcionamiento se basa en la compresión del material entre una superficie cónica fija y un cono interno móvil que gira excéntricamente. Este movimiento genera una acción de trituración continua a medida que el material desciende por gravedad a través de la cámara de conminución. Existen 2 tipos de chancadores de cono, siendo el modelo Symons uno de los más comunes, con variantes "Standard" para trituración gruesa y "Short-Head" para trituración fina. Este tipo de chancador es valorado por su alta capacidad y versatilidad para adaptarse a distintos requerimientos operacionales.

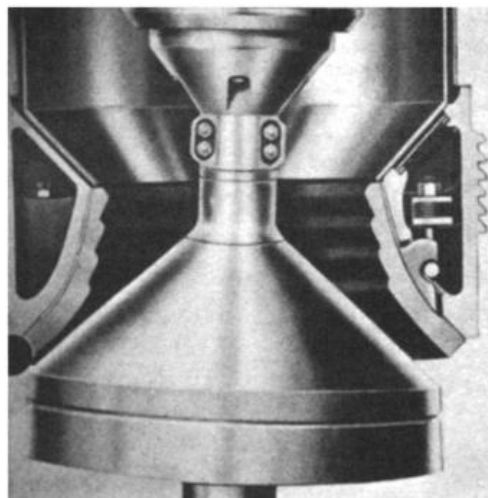


Figura 2.4 "Sección trasversal chancador de cono"

Chancador de impacto: se diferencia de los equipos de compresión (mandíbulas, cono y giratorio), ya que basa su principio de funcionamiento en la transferencia de energía cinética. El material ingresa a una cámara donde un rotor de alta velocidad proyecta las partículas contra placas de impacto (*blow bars*), generando fractura por choque. Este mecanismo se complementa con la colisión entre partículas dentro de la cámara, lo que contribuye a la reducción de tamaño y a la obtención de productos de mejor cubicidad.

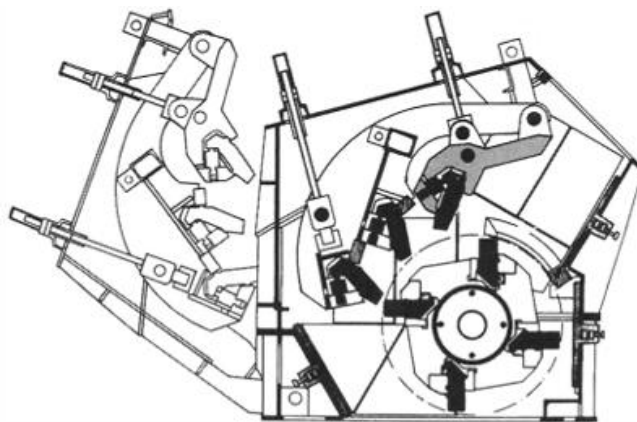


Figura 2.5 "Chancador de impacto"

Teniendo ya descritas las características operativas de los principales equipos de chancado es necesario contrastar sus capacidades para definir la opción más eficiente según las condiciones de operación. La Tabla 2.2 resume las especificaciones técnicas de los chancadores presentados. Se comparan los tamaños de alimentación permitidos, sus capacidades de alimentación y las ventajas y desventajas que posee cada tipo de chancador.

Tabla 2.2 "Tabla comparativa de chancadores"

Tipo de chancador	Etapa típica de aplicación	Capacidad	Producto característico	Ventajas	Desventajas
Mandíbulas	Primario	Baja-media (hasta 1.000 tph)	Producto irregular, tamaños grandes	Sencillo, robusto, acepta colpas grandes, fácil mantenimiento	Baja capacidad relativa, producto poco uniforme
Giratorio	Primario	Muy alta (hasta 10.000tph)	Tamaño controlado, apto para molienda	Alta capacidad, trituración continua, apto para plantas grandes	Elevado costo de inversión, requiere infraestructura robusta

Cono	Secundario / terciario	Media-alta	Granulometría controlada, buena cubicidad	Versátil, buen control de tamaño, alta reducción	Mayor desgaste, requiere alimentación uniforme
Impacto	Secundario / terciario	Media	Producto cúbico y uniforme	Buena cubicidad, reducción eficiente de dureza media	Alto desgaste, no apto para minerales muy abrasivos

2.3.3 Parámetros operacionales de los chancadores:

- CSS (*Close Side Setting*): Apertura mínima entre las superficies de trituración, que define el tamaño máximo del producto.
- OSS (*Open Side Setting*): Apertura máxima durante el ciclo de trituración.
- Carrera Excéntrica (*Eccentric Throw*): Corresponde al desplazamiento físico máximo que realiza el elemento móvil del chancador (mandíbula o manto) durante una revolución del eje principal, siendo la diferencia exacta entre el OSS y el CSS.
- Potencia en Vacío (*No Load Power*): Fracción de la potencia eléctrica consumida por el motor exclusivamente para mantener el equipo operando en régimen nominal sin carga de mineral. Este consumo no realiza trabajo de fractura, sino que es absorbido para vencer la inercia masiva de los componentes móviles y la fricción mecánica. En equipos primarios robustos, puede representar entre un 25% y un 50% de la capacidad instalada.
- Capacidad de diseño (TPH): Tonelaje que puede ser procesado bajo condiciones nominales.
- Relación de reducción: Cociente entre el tamaño de alimentación y el tamaño de producto.

Estos parámetros, junto con la dureza del mineral y la granulometría de alimentación, determinan el rendimiento energético y la distribución de tamaños obtenida en el producto final.

2.4. Problema de los finos en el chancado

En el contexto del chancado primario, esta operación se denomina precibado o preclasificación (también conocida como *scalping* o *escalpe de la trituración*). Estos términos se emplean como sinónimos en la literatura técnica y hacen referencia a la remoción del material fino antes de que ingrese al chancador primario. La presencia excesiva de partículas finas en la alimentación al chancador primario constituye una de las principales limitaciones operacionales del proceso. Estas partículas tienden a ocupar los espacios vacíos entre fragmentos gruesos, generando el fenómeno conocido como *packing*. Esto reduce la eficiencia de la fragmentación, incrementa el

consumo específico de energía y acelera el desgaste de componentes críticos como mandíbulas y revestimientos (Fladvad & Onnela, 2020).

Desde el punto de vista operativo, una alimentación con alto contenido de finos puede provocar:

- Reducción de la capacidad efectiva del chancador, al bloquear parcialmente la cámara de trituración.
- Variabilidad en la granulometría del producto, debido a una fragmentación menos controlada.
- Mayor frecuencia de detenciones no programadas, asociadas a atascamientos o acumulación excesiva de material.
- Incremento de costos de mantenimiento, por el desgaste prematuro de los revestimientos y componentes internos.

Estudios experimentales realizados en chancadores de mandíbula demuestran que un alto porcentaje de partículas menores a 4 mm en la alimentación reduce significativamente la calidad del producto y aumenta el consumo energético del equipo (Fladvad & Onnela, 2020). De manera complementaria, simulaciones numéricas basadas en el método del elemento discreto (DEM) evidencian que la presencia de finos altera la dinámica de compresión en la cámara de trituración, disminuye la productividad y afecta negativamente la forma del agregado producido (Cleary et al., 2017).

En consecuencia, controlar y reducir el contenido de finos en la alimentación al chancador primario es una condición necesaria para garantizar estabilidad operacional, eficiencia energética y mayor vida útil de los equipos. Esto da fundamento a la aplicación de estrategias de precibado, que serán abordadas en la siguiente sección.

2.5. Clasificación y precibado en chancado primario

La clasificación de minerales es un proceso que tiene como finalidad separar las partículas de un material según su tamaño, mediante el uso de cribas, harneros o equipos vibratorios. En el contexto de la conminución, cumple un rol clave para controlar la distribución granulométrica en las distintas etapas del circuito, evitando la sobrecarga de equipos y mejorando la eficiencia global del proceso (Wills & Napier-Munn, 2006).

En la etapa de chancado primario, la aplicación de clasificación recibe el nombre de precibado o preclasificación (también conocido como *escalpe de la trituración*). Todos estos términos se emplean como sinónimos en la literatura técnica, y hacen referencia a la remoción del material fino antes de que ingrese al chancador primario. Esta operación busca reducir la carga

innecesaria de finos que no requieren ser fragmentados, optimizando el desempeño del circuito (Universidad de Antioquia, 2019; UPCT, 2019).

2.5.1 Principios del precibado

El cribado se fundamenta en el paso selectivo de partículas a través de una superficie perforada o de barras, distinguiendo entre:

- Undersize: partículas menores al tamaño de abertura, que atraviesan la criba.
- Oversize: partículas mayores al tamaño de abertura, que son retenidas y descargadas como producto grueso.

La eficiencia de esta operación depende de diversos factores, tales como:

- Granulometría y distribución de tamaños en la alimentación.
- Humedad y contenido de finos (que pueden producir adherencias y cegado de mallas).
- Ángulo de inclinación de la criba.
- Velocidad y amplitud de la vibración (en el caso de los harneros vibratorios).
- Espesor y material de la superficie cribante.

Según el Metso Crushing and Screening Handbook, una eficiencia de 90-95% en cribado se considera optima en condiciones industriales.

2.5.2 Los fundamentos físicos del proceso de clasificación

El proceso de clasificación industrial no es una separación ideal. La eficiencia con la que trabaja un harnero o un Grizzly feeder al separar las partículas depende de la interacción probabilística entre el material y la superficie de cribado. Según Wills & Napier-Munn (2006), el mecanismo de clasificación se rige por dos fenómenos físicos simultáneos: la estratificación y la probabilidad de separación.

Fenómeno de estratificación:

La estratificación es el proceso mediante el cual las partículas de una cama de material se ordenan verticalmente según su tamaño debido a la vibración. En un lecho vibratorio, las partículas finas tienden a percolar a través de los huecos formados por las partículas más grandes, descendiendo hacia la superficie del fondo, mientras que las partículas gruesas ascienden a la parte superior del lecho, esto se conoce como el “efecto nuez de Brasil”

Según el Metso *screening handbook* (2018), para que la estratificación sea efectiva y eficiente se deben cumplir condiciones críticas de operación:

1. Espesor del lecho: Si el lecho es demasiado profundo, las partículas finas no logran llegar a la superficie de la malla antes de ser descargadas. Se recomienda que el espesor del lecho al final de la descarga no supere 3 o 4 veces el tamaño de abertura.

2. Humedad del material: La humedad superficial genera fuerzas capilares que aglomeran los finos adhiriéndolos a los gruesos, impidiendo la estratificación efectiva.

Una vez que la partícula fina alcanza la superficie de cribado, debe atravesar la abertura. La probabilidad teórica P de que una partícula esférica de diámetro d pase a través de una abertura cuadrada de lado a , con un diámetro de alambre o de barra w , sin tocar los bordes está descrita por la ecuación de Gaudin:

$$P = \left(\frac{a - d}{a + w} \right)^2 \quad (5)$$

El análisis de esta ecuación revela tres zonas de comportamiento:

- Zona de paso libre ($d \ll a$): Partículas muy pequeñas respecto a la abertura tienen una probabilidad cercana al 100% de pasar ($P \approx 1$).
- Zona crítica o “*Near Size*” ($d \approx a$): A medida que el diámetro de la partícula se acerca al tamaño de la abertura, el numerador ($a - d$) tiende a cero, reduciendo drásticamente la probabilidad de paso. Estas partículas son las principales causantes del taponamiento de la malla.
- Zona de rechazo ($d > a$): Probabilidad de cero de pasar.

2.5.3 Equipos de clasificación o precibado

La selección del equipo de clasificación para una etapa de chancado primario es importante, ya que debe escoger uno que sea capaz de soportar las condiciones operativas, incluyendo el impacto directo de colpas de gran tamaño (ROM) y flujos variables de alimentación. A diferencia de los harneros de etapas secundarias o terciarias, donde la precisión de corte es la prioridad, en etapas primarias de chancado se debe priorizar la robustez mecánica y la capacidad de disipar la energía de impacto sin sufrir daños estructurales.

En la industria minera de gran escala, los equipos se clasifican principalmente por su mecanismo de vibración y la geometría de su superficie de precibado. Para la aplicación de precibado o

scalping, los equipos deben garantizar no solo la separación eficiente del material fino, sino también el transporte fluido de material grueso hacia el chancador.

Los equipos más utilizados para realizar el precibado son:

Grizzly Vibratorio (Vibration Grizzly Feeder – VGF): Es el estándar de la minería de roca dura debido a su capacidad de absorber la energía de impacto de la descarga de camiones (ROM). Según el manual de Metso (2023), los alimentadores Grizzly utilizan un movimiento lineal generado por excitadores mecánicos o vibradores desbalanceados, lo que permite transportar el material horizontalmente mientras se realiza la estratificación.

- Mecanismo de Acción: la vibración lineal lanza el material el material hacia adelante y hacia arriba. Esto no solo transporta la carga, sino que promueve que las partículas finas percolen a través del lecho hacia la superficie de la parrilla (estratificación), aumentando la probabilidad de que las partículas de tamaño bajo pasen por la apertura.
- Configuración de Barras: se utilizan barras cónicas o trapezoidales con un ángulo de alivio para evitar el atascamiento de rocas de tamaño crítico.

Permiten separar fracciones finas, típicamente bajo 4" a 6", y al mismo tiempo regulan el flujo de alimentación al chancador (Metso, 2020; Sandvik, 2019).

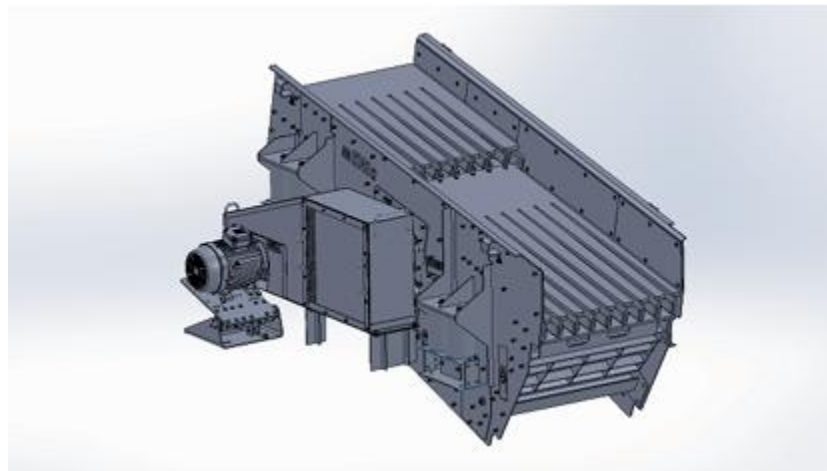


Figura 2.6 "Grizzly Screen SG-H Sandvik"

Harneros de Escalpe de Alta Resistencia (Heavy Duty Scalper): A diferencia del Grizzly Feeder, que prioriza el transporte y la resistencia al impacto bruto, el Harnero de Escalpe es un equipo diseñado específicamente para maximizar la eficiencia de separación, con eficiencias reportadas

entre 70% y 80% bajo condiciones adecuadas de operación (Nunes Filho, 2018). Se utilizan cuando se requiere un corte granulométrico más preciso.

- Mecanismo de acción: Como superficie de cribado utilizan placas perforadas de acero de alta resistencia, parrillas de goma o poliuretano. A través de frecuencias de vibración ajustables, estratifican el material rápidamente. Según Metso (2023), estos equipos operan con inclinaciones entre 15 y 25 grados para facilitar el flujo de material grueso.



Figura 2.7 " Lokotrack mobile screen"

2.5.4 Parámetros operacionales de diseño

Una vez seleccionado el equipo, su desempeño operativo se rige por variables de diseño que deben ser calculadas para asegurar la eficiencia de la separación. Basado en el Metso screening handbook (2023), los factores determinantes para el dimensionamiento son:

- Profundidad del lecho: La estratificación es el prerequisite físico para la clasificación. Para que los finos logren percolar a través de las rocas de mayor tamaño y lleguen a la superficie de cribado, la altura de material sobre el equipo no debe ser excesiva. Como regla de diseño el manual de Metso (2023) nos plantea que la profundidad del lecho en el extremo de carga no debe ser superior a 4 veces el tamaño de abertura de corte del equipo. De lo contrario el material fino podría ser arrastrado con el material grueso, reduciendo la eficiencia del circuito. Esta directamente ligado con la alimentación del equipo (tph).
- Area abierta: Es la relación porcentual entre la superficie total de los orificios (huecos) y la superficie total del panel de cribado. Una mayor área abierta incrementa la capacidad de procesamiento por metro cuadrado, pero generalmente implica una menor vida útil del panel debido a la reducción de material estructural.

- Vibración del equipo: Se define por la combinación de Amplitud (*Stroke*) y Frecuencia (RPM). Esta variable genera la aceleración (Fuerza G) necesaria para despegar el material de la malla, evitar el atascamiento y promover la estratificación de los finos hacia el fondo del lecho.
- Distribución Granulométrica: La composición del alimento dicta la dificultad de la separación. Se presta especial atención al porcentaje de material "crítico" o *near-size* (partículas con tamaño entre 0.7 y 1.0 veces la abertura), las cuales tienen alta probabilidad de atascarse en la malla y bloquear el paso a los finos restantes.

Diversos estudios han demostrado que la presencia de partículas menores a 4mm en la alimentación al chancador pueden reducir significativamente la eficiencia energética, al interferir en el mecanismo de compresión efectiva dentro de la cámara de trituración. De acuerdo con el *Crushing and Screening Handbook* de Metso (2023), el precibado representa una práctica ampliamente recomendada en chancado primario, ya que mejora la productividad sin requerir rediseños mayores en el circuito. Su implementación favorece una operación más eficiente, sostenible y confiable.

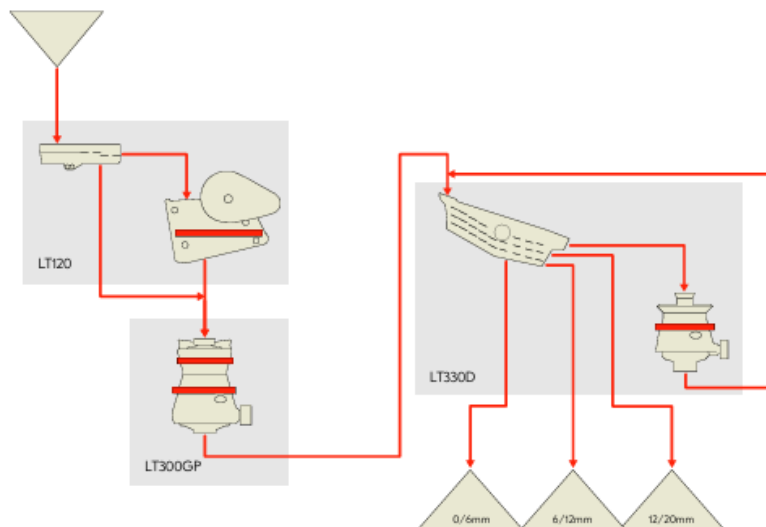


Figura 2.8 "Circuito de chancado con precibado y clasificación en múltiples etapas"

La Figura 2.8 presenta un ejemplo de un circuito de chancado y clasificación con precibado, donde el material es inicialmente sometido a una etapa de escalpe. Posteriormente, la fracción gruesa ingresa al chancador primario, mientras que las partículas finas son derivadas hacia equipos de clasificación secundaria, permitiendo obtener diferentes rangos granulométricos como

0/6 mm, 6/12 mm y 12/20 mm. Este tipo de configuración es común en la industria minera y de áridos, ya que asegura un producto final más homogéneo y eficiente desde el punto de vista energético.

La literatura especializada y reportes industriales coinciden en los beneficios del precibado:

- Reducción de la carga directa al chancador: hasta un 30–35% del tonelaje de alimentación puede ser removido antes de la trituración (Farouk, 2019).
- Mejora en eficiencia energética: al eliminar partículas que no requieren fragmentación, se optimiza el uso de la energía aplicada (Fladvad & Onnela, 2020).
- Disminución del desgaste: menor abrasión sobre mandíbulas y revestimientos al reducir la presencia de material fino innecesario (Cleary et al., 2017).
- Estabilidad operacional: disminuyen los riesgos de atascamiento y las detenciones no programadas (Weir, 2023).

En resumen, la clasificación de mineral es una etapa esencial para el control y la optimización de los circuitos de chancado y molienda, siendo particularmente efectiva como estrategia de mejora en plantas donde no se ha implementado y se busca aumentar la productividad sin alterar el diseño general del sistema. La implementación de un filtro de finos o preclasificación contribuye no solo a mejorar el rendimiento operativo, sino también a reducir costos de mantenimiento y consumo energético, puntos clave para una operación minera más sostenible.

2.6. Simulación de procesos de conminución

La simulación computacional se ha transformado en una herramienta indispensable en el ámbito del procesamiento de minerales, ya que permite evaluar, optimizar y predecir el comportamiento de los circuitos de chancado y molienda sin necesidad de intervenir físicamente la planta. Esta capacidad resulta especialmente relevante en la actualidad, donde los costos energéticos y de mantenimiento representan una proporción significativa de la operación minera (King, 2012).

El principio fundamental de estas herramientas consiste en representar matemáticamente el funcionamiento de los equipos de conminución y los flujos de material en una planta. De este modo, es posible realizar balances de masa y energía bajo diferentes condiciones de operación, lo que facilita la comparación entre escenarios alternativos y la identificación de configuraciones más eficientes (Napier-Munn et al., 1996).

2.6.1 Alcances de la simulación en minería.

El uso de simulación entrega múltiples beneficios en el ámbito de la ingeniería de procesos, entre los cuales destacan:

- Diseño de circuitos: permite construir diagramas de flujo completos, evaluando la disposición óptima de chancadores, harneros y molinos en función de la capacidad de la planta y las características del mineral.
- Predicción del comportamiento del mineral: al incorporar curvas granulométricas de alimentación y propiedades de dureza, es posible estimar el tamaño de producto (P_{80}) en diferentes condiciones.
- Optimización energética: mediante la estimación del consumo específico de energía (kWh/t), la simulación contribuye a seleccionar la configuración de equipos que minimiza el gasto energético.
- Evaluación de mejoras operacionales: facilita analizar el impacto de estrategias como la incorporación de precibado, la modificación de aberturas de descarga (CSS) o cambios en el tonelaje de alimentación.
- Reducción de riesgos y costos: al evitar pruebas experimentales directas en la planta, se disminuyen riesgos de detenciones no programadas y se reducen costos de implementación.

2.6.2 Fundamentos Matemáticos de la Simulación

La simulación de procesos de conminución no se limita a un balance de masas aritmético; se fundamenta en modelos fenomenológicos desarrollados por el JKMRC. Que describen físicamente la probabilidad de ruptura y selección de partículas dentro de los equipos. Para el caso de estudio (Chancado y Clasificación), los algoritmos matemáticos que gobiernan la simulación son:

Modelo Matricial de Chancado (Whiten): El comportamiento del chancador de mandíbulas se basa en el modelo de trituradora de Andersen & Whiten (1972). El cual lo modela conceptualmente como un reactor de mezcla perfecta, donde ocurren ciclos repetitivos de fractura y clasificación interna. La ecuación fundamental de balance de población que resuelve el simulador es:

$$P = (I - C) \cdot (I - C \cdot B)^{-1} \cdot F \quad (6)$$

Donde:

P : Vector columna que representa la distribución granulométrica del producto.

F : Vector columna de distribución de alimentación.

I : Matriz de identidad.

C : Matriz de clasificación diagonal, que define la probabilidad de que una partícula de tamaño i sea descargada del chancador sin sufrir una nueva fractura (depende del CSS).

B : Matriz de función de fractura, que describe la distribución de fragmentos hijos generados tras la ruptura de una partícula madre.

Función de Fractura y Energía (t_{10}): La intensidad de la ruptura dentro de la matriz B no es arbitraria; se relaciona con la energía específica consumida (E_{cs}) mediante la relación empírica establecida por el JKMRC:

$$t_{10} = A \cdot (1 - e^{-b \cdot E_{cs}}) \quad (7)$$

Aquí el parámetro t_{10} representa el porcentaje de material que, tras el impacto, es menor a 1/10 del tamaño original de la partícula. Los parámetros A y b son constantes propias del mineral que caracterizan su dureza y al impacto, permitiendo al modelo predecir cambios en la granulometría ante variaciones en la potencia y dureza de la roca.

Modelo de Clasificación (Curva de Partición): Para la etapa de precibado (*Grizzly*), no se modela como un corte ideal, sino mediante una función de probabilidad. Esta función define la Eficiencia de Separación $E(d)$, la cual representa la fracción de partículas de tamaño d que logran el atravesar el medio de cribado hacia el flujo de finos:

$$E(d) = C \cdot \left(\frac{(e^{\alpha} - 1)}{(e^{\alpha \frac{d}{d_{50}}} + e^{\alpha} - 2)} \right) \quad (8)$$

Donde:

d_{50} : Tamaño de corte, diámetro de partícula que tiene 50% de probabilidad pasar o ser retenida.

C (*Water Split*): Corresponde a un factor de ajuste global de eficiencia

α (*Alpha*): al parámetro de agudeza de la curva

Este modelo permite representar de manera realista la separación y su eficiencia en función del tamaño de corte deseado.

2.6.3 Principales herramientas de simulación:

- JKSImMet: desarrollado por el *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC)* de la Universidad de Queensland, es uno de los programas más utilizados en la industria minera. Sus modelos están calibrados con datos experimentales y permiten simular chancadores de mandíbula, giratorios, de cono, así como circuitos de molienda SAG y de bolas. Se utiliza tanto en investigación académica como en operaciones industriales para analizar configuraciones complejas y predecir el rendimiento de los equipos (JKTech, 2020).
- Bruno: software comercial de Metso orientado al diseño preliminar de plantas de trituración y cribado. Aunque su alcance es más limitado que JKSImMet, ofrece la ventaja de una interfaz intuitiva y la posibilidad de generar diagramas de flujo y estimaciones rápidas de capacidad, tonelaje y distribución granulométrica en etapas tempranas de proyectos (Metso, 2019).
- Rocky DEM y simulaciones basadas en Método del Elemento Discreto (DEM): representan un enfoque más detallado, al modelar el movimiento individual de miles de partículas dentro de los equipos. Esta metodología permite analizar la dinámica interna de la cámara de trituración, visualizar la distribución de esfuerzos, la trayectoria de las partículas y el efecto del contenido de finos en la eficiencia. Estudios como el de Cleary et al. (2017) han demostrado que el DEM es una herramienta eficaz para comprender cómo el exceso de partículas finas modifica el mecanismo de compresión en chancadores de mandíbula, reduciendo su productividad.

En el contexto de esta memoria, la simulación cobra especial relevancia porque permite cuantificar el efecto del precibado sobre la productividad y eficiencia energética del chancador primario. Mediante la modelación en softwares como JKSImMet y Bruno, es posible establecer escenarios comparativos:

- 1. Alimentación directa al chancador (sin precibado).
- 2. Alimentación con precibado, removiendo una fracción de finos previamente.

Al analizar ambos casos, se pueden obtener indicadores como:

- Reducción efectiva de carga en el chancador (% de finos removidos).
- Variación en el consumo específico de energía (kWh/t).

- Cambios en la granulometría de producto (P_{80}).
- Impacto en la vida útil de revestimientos y componentes internos.

2.6.4 Ejemplos recientes de la aplicación de la simulación de procesos de conminución:

- Vizcarra (2023): empleó la base de datos de JKTech y simulaciones en JKSImMet para validar modelos energéticos en molinos SAG, obteniendo mejoras significativas en la precisión de predicciones de consumo energético.
- FLSmidth (2024): desarrolló modelos dinámicos integrados de molienda SAG y chancado de *pebbles*, aplicando ecuaciones de equilibrio poblacional. Sus resultados demostraron un incremento en la eficiencia global del circuito al ajustar parámetros de operación de manera simultánea.

Estos ejemplos refuerzan que la simulación no solo es útil como herramienta académica, sino que constituye un componente estratégico en la optimización de plantas de procesamiento mineral a nivel industrial.

Si bien la simulación es una herramienta poderosa, también presenta limitaciones. La precisión de los modelos depende en gran medida de la calibración con datos experimentales reales, lo que implica la necesidad de contar con curvas granulométricas confiables y parámetros de operación bien definidos. Asimismo, los softwares de tipo empírico (como Bruno) no siempre capturan con exactitud la complejidad del comportamiento del mineral, mientras que los modelos DEM, si bien más detallados, requieren un alto poder computacional y tiempos de simulación extensos.

En conclusión, la simulación de procesos de conminución constituye un componente esencial para la ingeniería de procesos mineros, al posibilitar un análisis predictivo y fundamentado de alternativas de optimización. En esta memoria, su utilización permite demostrar con base cuantitativa que la implementación de precibado contribuye a mejorar la productividad, reducir el consumo energético y extender la vida útil de los equipos de chancado primario.

2.7. Impacto de la Preclasificación en la Productividad

El consumo energético es uno de los principales indicadores de desempeño en los procesos de conminución, dado que representa entre el 30% y 50% de la energía total utilizada en una planta de procesamiento mineral (Wills & Napier-Munn, 2006). En la minería de alta escala maximizar la productividad es un factor determinante para la rentabilidad. En este contexto optimizar la

configuración de la alimentación constituye una estrategia crítica no solo para la sostenibilidad energética, sino para destrabar los límites de la capacidad de la instalación.

Diversos estudios han demostrado que la presencia excesiva de partículas finas en la alimentación al chancador primario afecta negativamente tanto la eficiencia energética como la productividad. Esto ocurre porque los finos tienden a ocupar los espacios entre las partículas gruesas, generando el fenómeno conocido como *packing*. Como resultado, la cámara de trituración se satura prematuramente, operando como un cuello de botella que restringe la entrada de nuevo mineral limitando las toneladas por hora procesadas. Simultáneamente la energía aplicada en la cámara de trituración no se utiliza de manera efectiva en la fragmentación, sino que se disipa en fricción y compresión ineficiente, lo que incrementa el consumo específico de energía (Fladvad & Onnela, 2020).

Además, el exceso de finos puede alterar la dinámica de esfuerzos en el equipo, disminuyendo la capacidad de tratamiento y afectando la granulometría del producto. Simulaciones realizadas mediante el Método del Elemento Discreto (DEM) evidencian que los finos reducen la eficiencia de compresión y modifican la distribución de tensiones en la cámara, impactando en la forma y calidad del material procesado (Cleary et al., 2017).

En este escenario, la incorporación de sistemas de precibado o preclasificación constituye una estrategia ampliamente recomendada para mejorar el rendimiento energético de los circuitos de chancado. Según Ramli et al (2019), hasta un 30–35% del tonelaje de alimentación puede ser removido antes de ingresar al chancador. Al extraer esta fracción de mineral, se genera una holgura volumétrica inmediata. Este efecto permite a la planta asimilar un flujo de alimentación considerablemente mayor antes de saturar los equipos.

Fabricantes de equipos y empresas proveedoras de tecnología como Metso (2020) y Weir Minerals (2023) destacan que el precibado contribuye directamente a la estabilidad operacional. Al remover las fracciones que no requieren fragmentación, se evita la sobrecarga volumétrica del equipo, se reduce la frecuencia de detenciones no programadas y el desgaste de revestimientos por partículas abrasivas. En consecuencia, el circuito opera con mayor regularidad, procesando más toneladas por hora y consumiendo menos energía por tonelada tratada.

Desde una perspectiva ambiental, la reducción en el consumo energético derivada del precibado también implica una disminución de la huella de carbono y de los costos operativos, lo que refuerza su rol dentro de las prácticas de minería sustentable.

En síntesis, la evidencia técnica coincide en que la implementación del precibado en el chancado primario constituye una medida dual: es el mecanismo principal para eliminar el cuello de botella volumétrico (maximizando la productividad) y, simultáneamente, una herramienta eficaz para mejorar la eficiencia energética. Por lo tanto, se trata de una estrategia operativa que apuntala la rentabilidad y competitividad de la minería moderna.

2.8. Fundamentos de Evaluación Económica en Proyectos

En la industria minera, toda modificación u optimización de un circuito de conminución debe estar justificada no solo por su viabilidad operativa sino por su rentabilidad financiera. Para proyectos de mejora en instalaciones existentes, la evaluación económica se centra en cuantificar el impacto directo de la modificación sobre los flujos de caja de la operación, contrastando los costos de implementación frente a los beneficios económicos generados.

Los componentes fundamentales para estructurar esta evaluación se dividen en tres grandes bloques:

2.8.1 Inversión de Capital (CAPEX- *Capital Expenditure*):

Corresponde a los desembolsos iniciales requeridos para adquirir, instalar y poner en marcha los nuevos activos físicos. En el contexto de la incorporación de un equipo de preclasificación, el CAPEX no se limita únicamente al valor de compra del equipo principal (*Grizzly Feeder*), sino que debe considerar el factor de instalación. Este factor agrupa los costos asociados a obras civiles, estructuras metálicas, modificaciones en la disposición de chutes de traspaso, empalmes eléctricos y adaptaciones en las correas transportadoras necesarias para habilitar el *bypass* de material hacia etapas posteriores.

Para esto, una de las técnicas de estimación más utilizadas es el factor de Lang, el cual permite estimar el costo total de la implementación del equipo a partir del costo de adquisición de este mismo. Este factor varía según el tipo de proceso en el que se está trabajando, para este caso el valor propuesto para una planta de sólidos se encuentra entre un factor de 3 y 4. Por lo que para este análisis económico utilizaremos un valor del factor de Lang de 3,5 para la estimación total del CAPEX en la implementación del *Grizzly Feeder*.

2.8.2 Costos Operacionales (OPEX- *Operational Expenditure*):

El OPEX representa los gastos continuos necesarios para mantener el sistema en funcionamiento. Al evaluar una modificación en el circuito, se debe realizar un análisis de OPEX diferencial, considerando:

- Costo Energético: Variación del consumo eléctrico global del circuito, valorizado según la tarifa energética industrial (Us/kWh o Us/MWh). La preclasificación suele generar un ahorro específico al evitar el trabajo mecánico ineficiente sobre partículas finas.
- Costo de Mantenimiento y Desgaste: inversión periódica en repuestos y elementos de desgaste (barras de harnero, revestimientos). Una menor carga circulante en las cámaras de trituración tiende a reducir la frecuencia de cambio de muelas y cóncavos, generando un saldo positivo en el mantenimiento general.

2.8.3 Evaluación Económica Marginal y Beneficio por Productividad:

Para medir la rentabilidad de destrabar un cuello de botella, se utiliza el enfoque de evaluación marginal. Este método no calcula el valor actual neto (VAN) de toda la compañía minera, sino que aísla el flujo de caja adicional generado exclusivamente por la optimización.

El mayor motor de valor en este tipo de proyectos es el aumento de la capacidad de tratamiento. El beneficio marginal se calcula proyectando económicamente el tonelaje adicional procesable, ajustado por factores operacionales y de mercado:

$$BM = (\Delta TPH) \times (PM - Costo) \quad (9)$$

Donde:

BM: Beneficio Marginal.

Δ TPH: Incremento de producción.

PM: Precio del metal.

Costo: Costo de procesamiento del metal.

La contrastación de este beneficio económico continuo frente a los costos CAPEX y OPEX justificar la viabilidad estratégica de la modificación propuesta.

2.9. Cierre marco teórico

La revisión realizada permite establecer que la conminución es una operación fundamental dentro del procesamiento de minerales, al reducir el tamaño de las colpas provenientes de la mina y preparar el material para las etapas de concentración. Sin embargo, se trata también de una de las fases más intensivas en consumo energético, con eficiencias de uso de energía inferiores al 10% en la fractura efectiva. Por ello, optimizar cada etapa de este proceso constituye un objetivo clave en la minería moderna.

Las teorías clásicas de Rittinger, Kick y Bond, complementadas con enfoques más recientes como la ley de Charles y los modelos basados en fractomecánica, aportan una base conceptual para comprender la relación entre la energía aplicada y la reducción de tamaño lograda. No obstante, se reconoce que estas leyes presentan limitaciones al no considerar la heterogeneidad mineralógica ni los fenómenos dinámicos en equipos industriales, lo que refuerza la necesidad de combinar teoría con modelos experimentales y simulaciones computacionales.

El análisis de los equipos de chancado evidencia que su productividad está estrictamente dictada por su volumen útil. La literatura técnica confirma que el ingreso de finos naturales a la cámara genera un fenómeno de compactación (*packing*) que ahoga la máquina, restringe la entrada de colpas gruesas y disipa energía en fricción ineficiente. En respuesta a esto, el precibado y la desviación temprana de finos se consolida no solo como una medida de protección de revestimientos o de ahorro energético, sino como la principal estrategia operativa para destrabar el límite de tratamiento, liberando capacidad instalada para procesar un mayor tonelaje (TPH).

Para evaluar este fenómeno, la simulación computacional en estado estacionario mediante plataformas como JKSImMet se presenta como la herramienta de ingeniería estándar. Esta permite estimar de manera confiable la respuesta fenomenológica del circuito (potencia demandada, flujos y granulometría final) frente a modificaciones en la configuración de la alimentación, basándose en modelos matemáticos probados como el de Andersen/Whiten.

Finalmente, la revisión de los fundamentos de evaluación económica marginal establece la metodología necesaria para justificar proyectos de optimización. Al contrastar los costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX) frente a los beneficios económicos directos generados por el incremento del tonelaje procesado, es posible determinar la viabilidad financiera de la modificación.

En conjunto, la evidencia teórica y experimental revisada proporciona un marco conceptual sólido que respalda la hipótesis de este estudio: la incorporación de precibado en el chancado primario elimina la restricción volumétrica del circuito, incrementando drásticamente la productividad de la planta y mejorando la eficiencia global del proceso. Esta base orienta el diseño de las simulaciones y la posterior evaluación económica aplicada al caso de estudio.

3. Metodología propuesta

La metodología propuesta se orienta a evaluar el impacto del precibado en la productividad y eficiencia energética del circuito de chancado primario, evaluando los siguientes indicadores: Tonelaje procesado (TPH); Consumo energético específico (kWh/t); Granulometría del producto (P_{80}); Porcentaje de finos removidos en el precibado; Relación de reducción efectiva. Mediante el uso de herramientas de simulación y análisis computacional. Para ello, se estructuran las siguientes etapas.

3.1. Recolección de datos y antecedentes

Se utilizarán datos granulométricos reales proporcionados por la empresa Valteck, provenientes de la operación en minera los pelambres. Estos datos corresponden al tamaño del material alimentado al chancador primario y la configuración de este mismo. Y serán utilizados para definir las condiciones base del modelo de simulación. Adicionalmente se recopilará información bibliográfica de textos como Mineral Processing Technology (Wills & Napier-Munn, 2006) y Mineral Comminution Circuits (Napier-Munn, 1996), junto con artículos técnicos de fabricantes como Metso.

Dado que la validez de la simulación dependerá de la calidad de los datos de entrada. Para esta memoria, la recolección de la información como se mencionó está basada en dos fuentes principales: Datos operacionales y Antecedentes técnicos bibliográficos.

3.1.1 Datos Operacionales

La información base para la construcción del modelo fue proporcionada por la empresa de ingeniería Valteck, colaboradora directa en el desarrollo de este estudio. Los datos corresponden a campañas de muestreos y registros operativos de la faena minera los pelambres, específicamente del circuito de chancado primario y secundario.

- Curva Granulométrica ROM: Se cuenta con la distribución de tamaños de la alimentación (*Run Of Mine*) al chancador, caracterizada hasta un tamaño máximo de 10 pulgadas. Este

dato es clave para definir la carga de finos inicial y evaluar el material que es susceptible a ser desviado mediante la etapa de preclasificación.

- **Parámetros de Diseño:** Se recopilieron las especificaciones técnicas del chancador primario y secundario actuales disponibles para en base a ellas configurar los equipos en el software y así establecer la línea base del circuito realizar el cálculo comparativo de potencia demandada.

3.1.2 Antecedentes Técnicos y Bibliográficos

Para complementar los datos operacionales y sustentar tanto el modelo de simulación como la evaluación técnico-económica, se recurrió a documentación interna de Valteck y a literatura especializada de referencia en la industria:

- **Informes Históricos y de Ingeniería Conceptual:** Se analizaron reportes y presentaciones que establecen las bases del caso de estudio y la evaluación económica.
- **Manuales de fabricantes:** Se utilizaron tablas de capacidad y factores de diseño del *Metso Crushing and Screening Handbook* (2023) para parametrizar el *Grizzly Feeder* propuesto y para los parámetros faltantes para los chancadores.
- **Literatura Especializada:** Los parámetros de fractura del mineral se estimaron en base a valores referenciales para pórfidos de cobre chilenos disponibles en la base de datos del Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) y textos como el *Mineral Comminution Circuits* (Napier-Munn, 1996).

3.1.3 Sistematización de la información

Para asegurar la trazabilidad de la información del estudio, se sistematizó la información recolectada en una matriz de datos de entrada. La Tabla 3.1 resume los antecedentes técnicos utilizados para la parametrización del modelo en JKSimMet:

Tabla 3.1 "Inventario de Datos y Fuentes"

Tipo de Dato	Descripción técnica	Fuente / Origen	Aplicación en el Modelo
Granulometría ROM	Distribución de tamaños de alimentación (F_{80}, F_{100})	Valteck (Datos de Planta)	<i>Stream</i> de Alimentación (Feed)

Especificaciones de Equipos	CSS, Potencia Instalada, Carrera Excéntrica	Valteck y Manuales Técnicos (Metso / Sandvik)	Parámetros del Chancador Primario y Secundario
Curvas de Clasificación	Eficiencia de cribado y factores de forma	<i>Metso Crushing and Screening Handbook</i> (2023)	Configuración del <i>Grizzly Feeder</i> (Clasificador)
Parámetros de Fractura	Dureza del mineral	Base de datos bibliográfica (JKMRC)	Función de Fractura del Chancador
Datos Económicos	Tarifa de energía industrial y variables para cálculo de beneficio margina	Reportes de Valteck y de Mercado	Evaluación Económica

3.2. Preparación de la base de datos y software computacional

Previo a la etapa de simulación, la información recopilada fue sometida a un proceso de aseguramiento de calidad (QA/QC). El objetivo de esta etapa fue transformar los datos brutos de planta en inputs compatibles con los algoritmos del software. Esta etapa es crítica para evitar errores por ingreso de datos.

3.2.1 Validación Datos Alimentación y Curva Granulométrica

Se seleccionaron los tamaños de malla más representativos para asegurar que la curva ajustada mantenga la tendencia y los puntos de inflexión de la distribución original. La Tabla 3.2 "Granulometría Alimentación" presenta la data final depurada y convertida al sistema internacional en mm, que servirá como alimentación para los escenarios de simulación.

Tabla 3.2 "Granulometría Alimentación"

mm	%
250	100
200	74,138
150	70,725

100	59,178
75	52,597
50	44,505
31,25	35,233
25	30,978
19	26,543
12,5	22,318
9,5	18,213
6,7	15,017
4,75	13,428
3,35	11,746
2,36	10,364
1,7	9,201
1,18	8,156
0,85	7,340
0,6	6,557
0,425	5,848
0,3	5,181
0,212	4,589
0,15	3,987
0,106	3,460
0,075	2,938
0,053	2,478
0,044	2,306
0,038	2,197
0	0

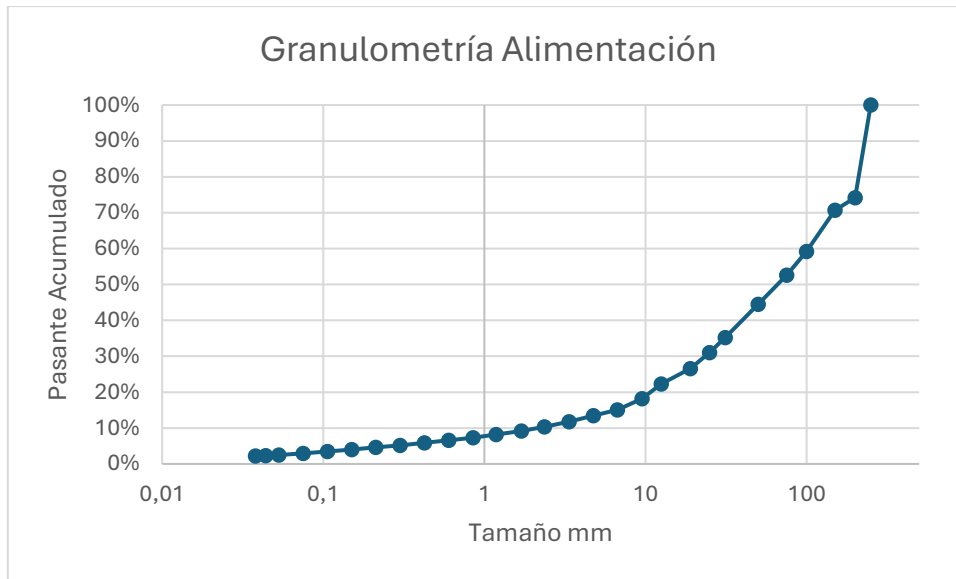


Figura 3.1 " Curva Granulométrica Alimentación"

Adicionalmente, se definió una Gravedad Específica del material (SG) de $2,7 \text{ t/m}^3$. Este valor corresponde al parámetro estándar de diseño para el mineral de tipo pórfido cuprífero (Andesita / Granodiorita) Procesado en Minera los Pelambres, y es consistente con los criterios de masa utilizados en los reportes de ingeniería proporcionados por Valteck. Dado que no se dispone de ensayos de caracterización de dureza específicos para el mineral del caso de estudio, se adoptaron parámetros de fractura representativos para este tipo litológico a partir de la base de datos del Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC).

3.2.2 Estandarización de Parámetros Operativos

Se verificaron y estandarizaron las condiciones operacionales de los equipos frente a la base de datos del proyecto. Los flujos nominales se fijaron en 1.000 TPH para la línea de evaluación, y las aberturas de descarga (*Close Side Setting* - CSS) del chancador primario y secundario se ajustaron a los valores históricos de operación de la planta, los demás parámetros no disponibles se complementaron con información de especificaciones técnicas de fabricantes, específicamente Metso y Sandvik.

Los valores utilizados en el modelo de Andersen/Whiten del chancador de mandíbulas fueron $A = 58$ y $b = 0,62$, resultando un índice $A \times b = 36$, el cual corresponde a un mineral de dureza media-alta, consistente con las características litológicas reportadas para el mineral de este yacimiento.

(Napier-Munn et al., 1996). Este valor se encuentra dentro del rango típico para pórfidos cupríferos chilenos ($A \times b$ entre 30 y 45), por lo que se considera una estimación conservadora y adecuada para los objetivos de esta simulación.

3.3. Estrategia de Simulación y Configuración de Escenarios

Una vez consolidados los datos, se procedió a la construcción del modelo digital en el software JKSImMet V6.1. Con el objetivo de evaluar el efecto de aplicar un filtro de finos en la alimentación del chancador primario, se diseñó una estrategia de simulación basada reproducir la dinámica del del circuito de chancado primario y secundario, para luego ser comparada con el escenario con preclasificación propuesta en este estudio.

De igual manera en esta etapa se definió la selección de los modelos matemáticos que se utilizarán para los equipos y los parámetros específicos de estos mismos.

3.3.1 Escenario 1: Caso Base

Este escenario replica digitalmente los datos de operación de la planta (sin preclasificación). Su objetivo es validar que el modelo matemático es capaz de representar el sistema, representar las limitaciones existentes, establecer una línea base de consumo energético y granulometría de producto.

Configuración: Alimentación directa del material ROM (1.000 tph) al chancador, sin una etapa previa de clasificación.

Chancador Primario: Configurado mediante el modelo de Andersen/Whiten, operando con un *Close Side Setting* (CCS) de 8 pulgadas.

Chancador Secundario: Configurado mediante el modelo de Andersen/Whiten, operando con un *Close Side Setting* (CCS) de 2 pulgadas.

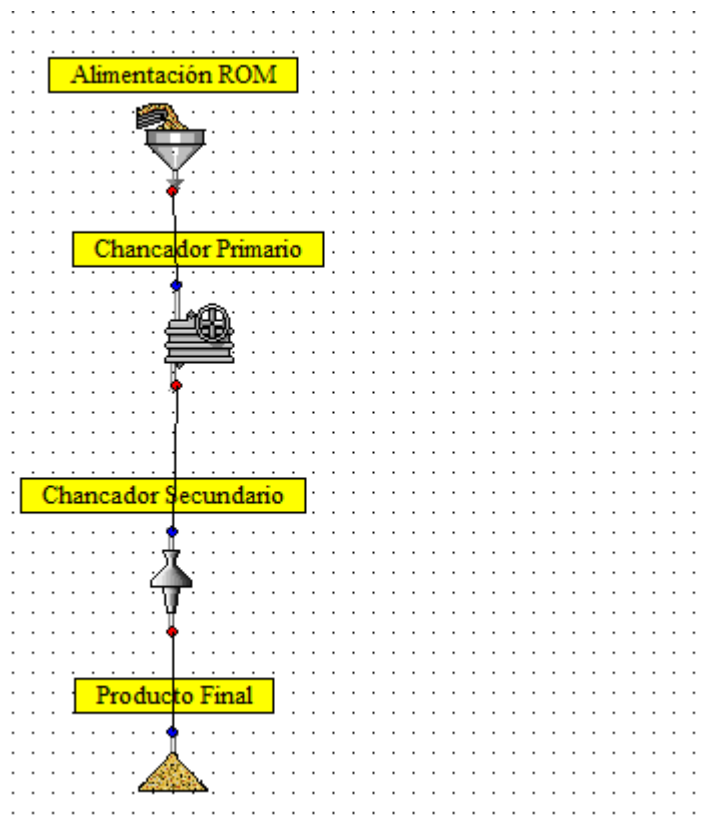


Figura 3.2 "Escenario 1: Caso Base"

3.3.2 Escenario 2: Caso Optimizado

Este escenario simula la implementación de la ingeniería propuesta. Se modifica el diagrama de flujo para evaluar el impacto de remover la fracción de finos de tamaño menor a 2 pulgadas previo a la etapa de chancado. Que es el tamaño de alimentación para la etapa siguiente que es la de molienda.

Configuración: Se introduce el equipo de clasificación entre la alimentación y el chancador. Con una clasificación selectiva con un tamaño de corte de 2 pulgadas. Los finos son desviados y se unen al producto final aguas abajo, mientras que solo el material grueso ingresa a la cámara de chancado. Esta mezcla constituye la alimentación final optimizada que será enviada a la siguiente etapa del proceso (molienda SAG). Manteniendo intactos los parámetros mecánicos del resto de equipos.

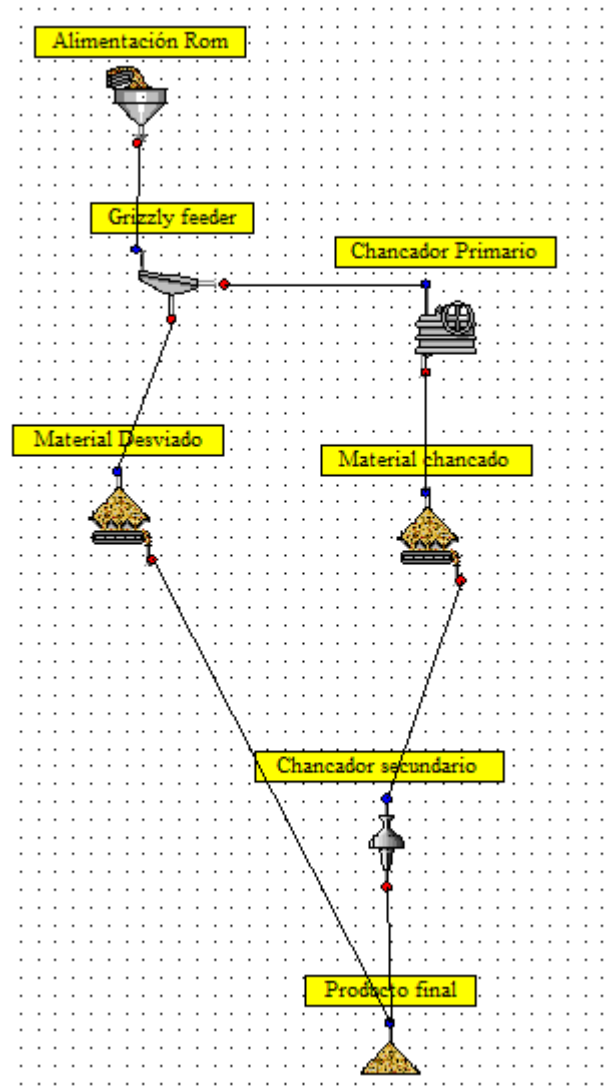


Figura 3.3 "Escenario 2: Caso Optimizado"

Para este escenario, el modelamiento permite cuantificar de manera precisa la tasa de *bypass* (TPH desviadas). Este indicador representa la capacidad instalada que se libera efectivamente en la etapa de chancado. De igual manera, se monitorea la potencia demandada y el P_{80} en el producto final combinado, asegurando que la redistribución de la carga granulométrica mantenga los estándares de calidad requeridos por la siguiente etapa (molienda).

3.3.3 Escenario 3: Ajuste de Parámetros Operativos – CSS

En respuesta a la liberación de capacidad volumétrica observada tras la remoción de finos en el Escenario 2, se propone la optimización operativa de reducir el CSS del chancador primario de 8 pulgadas a 7 pulgadas. El objetivo de esta modificación es maximizar el trabajo de conminución

en chancado primario así aprovechando la capacidad mecánica ociosa para entregar un mineral más manejable para el chancador secundario, logrando un balance de potencia optimo entre ambos equipos sin perjudicar la granulometría final.

3.3.4 Escenario 4: Prueba de Estrés

Habiendo establecido la configuración optima en el Escenario 3 (precibado a 2" y CSS primario a 7"). Este cuarto escenario se plantea como una prueba de estrés operacional del circuito optimizado. Habiendo establecido que la preclasificación desvía una cantidad importante de material liberando capacidad instalada en chancado, se debe maximizar la utilización de la planta. Es por esto que se incrementarán las toneladas de ingreso al circuito. Es aquí donde se verá reflejado el aumento de productividad asociado al precibado.

Configuración: Se mantiene la misma configuración del escenario 3 y se aumenta de manera iterativa la tasa de alimentación por sobre las 1.000 TPH iniciales hasta alcanzar el límite posible sin sobrecargar los equipos instalados. De forma complementaria, se realizará un monitoreo crítico de la potencia demandada por el chancador secundario (para evitar sobrecargas del motor) y de la variabilidad del P_{80} final, asegurando que el incremento en la productividad no degrade la calidad de la alimentación a la planta concentradora.

3.3.5 Parametrización en el software

A continuación, se documenta la configuración específica ingresada al software para la ejecución de los escenarios definidos. Se presentan capturas de la pantalla de los parámetros críticos de operación para validar la representatividad del modelo.

La configuración del modelo en JKSimMet se realizó definiendo primero los parámetros globales de alimentación y luego las especificaciones operativas para los cuatro escenarios de estudio: Caso Base (sin precibado), Caso Optimizado (con precibado), Ajuste de Parámetros Operativos (reducción de CSS a 7 pulgadas) y Prueba de estrés Operacional (incremento de la tasa de alimentación a 1150 tph).

A. Definición de Alimentación y Ajuste de Mallas:

Se ingresa para todos los casos como *feed* los datos proporcionados por Valteck, los cuales corresponden al material ROM. lo que se aprecia en la Tabla 3.2 "Granulometría Alimentación" Tabla 3.2 "Granulometría Alimentación". La cual fue ingresada al software

para caracterizar la alimentación, además se introducen en el software los parámetros de flujo de sólidos, gravedad específica y porcentaje de sólidos.

Quedando la alimentación configurada con los siguientes parámetros:

Flujo de solidos: 1000 tph.

Gravedad específica: $2,7 \text{ t/m}^3$

Contenido de solidos: 100%

Tamaño máximo de partícula: 250 mm

Parameter			Exp
TPH Solids			1000,000
Solids SG [t/m ³]			2,700
TPH Water			0,000
% Solids			100,000
Pulp SG [t/m ³]			2,700
Volumetric Flowrate [m ³ /h]			370,370
% Passing	50,800	[mm]	44,831
80,000	% passes [mm]		205,712

Figura 3.4 "Configuración de Alimentación"

Podemos apreciar en la Figura 3.4 "Configuración de Alimentación" que un 44,8% del material alimentado corresponde a material de tamaño inferior a las 2 pulgadas, que sería correspondiente al tamaño de alimentación de la etapa siguiente al chancado.

B. Configuración de Chancadores:

Para todos los escenarios los equipos de conminución se configuraron bajo el modelo fenomenológico de Andersen/Whiten. Se replicaron las especificaciones del chancador de planta.

Para los parámetros de fractura de mineral se adoptaron los valores $A = 58$ y $b = 0,62$, resultando un índice $A \times b = 36$, representativo de un pórfido cuprífero de competencia media-alta. Este valor es utilizado para la matriz de energía específica en el software, ante la ausencia de ensayos DWT fraccionales que caractericen el efecto tamaño de la roca, se construyó la matriz de energía específica (E_{cs}) en base a los valores de A y b seleccionados. El desarrollo analítico y los factores de escalamiento geométrico utilizados para la construcción de esta matriz se encuentran detallados en el Anexo 1: Cálculo de Energía Específica.

A continuación, se muestran los parámetros usados para los chancadores en los distintos escenarios simulados, referenciados a equipos de catálogo industrial y respaldados por literatura técnica para validar su factibilidad:

1- Chancador primario: (Chancador de Mandíbula)

Modelo Referencial Adoptado: Metso C160, el cual tiene una potencia nominal de 250 kW, capacidad de tratar aproximadamente 1000 tph y capacidad de operar con un CSS mínimo de 6 pulgadas.

Carrera Excéntrica: 40 mm.

Potencia en Vacío (No Load Power): 125 kW. Este valor representa el 50% de su capacidad instalada, adoptado en concordancia con la literatura para modelamiento de equipos de estas características (Numbi & Xia, 2014; Michaud, s.f.).

Abertura de Descarga (CSS):

Escenarios 1 y 2: 8 pulgadas (203,2 mm)

Escenarios 3 y 4: 7 pulgadas (177,8 mm)

2- Chancador Secundario: (Chancador de Cono)

Modelo Referencial Adoptado: Sandvik CH860i, el cual tiene una potencia nominal de 500 kW.

Carrera Excéntrica: 32 mm.

Potencia en Vacío (No Load Power): 150kW. Este valor representa un 30% de su capacidad nominal. Esta reducción en comparación al equipo de chancado primario refleja la mayor eficiencia mecánica de los chancadores de cono, manteniéndose en dentro del rango válido para la industria (Morrell et al., 1992).

Abertura de Descarga (CSS): 2 pulgadas (50,8 mm), mantenido constante en todos los escenarios evaluados para asegurar el cumplimiento del P_{80} para la etapa de molienda.

- C. **Configuración Precibado:** Para el segundo escenario, se configuro el precibado con un tamaño de corte de 2 pulgadas (50,8 mm). Se incluye el factor de ineficiencia por *bypass* de finos para representar la operación real bajo condiciones de humedad, adherencia y arrastre de finos hacia el chancador. Y así evitar sobreestimar el beneficio del equipo. Se selecciono el modelo *Single Deck Screen* En la simulación del Grizzly

Feeder en JKSimMet v6.1, el parámetro *Water Split to Fine Product* fue utilizado como factor de calibración para ajustar la fracción de finos desviada. Aunque originalmente corresponde a un parámetro hidráulico en harneros húmedos, en el caso de preclasificación seca se interpreta como un coeficiente de eficiencia global del equipo. Además, se configuró el parámetro *Alpha* (agudeza de corte) que representa la probabilidad de paso de partículas cercanas al tamaño de corte.

Parameter	Value
Sharpness of Efficient Curve - Alpha	4,000
Initial Dip in Efficient Curve - Beta	0,000
Water Split to Fine Product (%)	80,000
Corrected D50 - d50c (mm)	50,800
Calculated Value - Beta	1,000

Figura 3.5 " Configuración Clasificador"

- D. **Validación de Convergencia:** Las simulaciones se ejecutaron en modo estacionario hasta alcanzar un error de cierre de balance de masa inferior al 0,00001% garantizando así la consistencia matemática de los flujos máscicos calculados. Alcanzar este nivel de precisión matemática garantiza que no existan acumulaciones ni pérdidas virtuales de material (tonelaje) en los flujos. De esta manera, se asegura que los valores de flujo máscico (TPH), consumo energético de los equipos (kW) y las distribuciones granulométricas (P_{80}) que se reportan en los escenarios evaluados son íntegramente consistentes, conservadores y confiables para el análisis técnico del caso de negocio.

3.4. Procesamiento y análisis de resultados

Los datos obtenidos a partir de las simulaciones serán analizados de forma comparativa para evaluar cuantitativamente el impacto técnico de la preclasificación sobre el desempeño del chancador primario. Se tablas que permitan comparar indicadores clave como el tonelaje procesado, el consumo específico de energía y la reducción efectiva de carga.

El análisis se orientará a identificar:

- Alivio Operacional: Se evaluará el tonelaje efectivo de fracción fina que es desviado de la cámara del chancador primario. Este indicador representa directamente la capacidad instalada que queda libre para absorber un aumento de producción.
- Desempeño Energetico: Se contrastará la potencia neta demandada por los equipos de conminución bajo las distintas configuraciones.
- Calidad de Producto P_{80} : Dado que el circuito de chancado actúa como proveedor del proceso de molienda SAG, es necesario garantizar que la redistribución de los flujos no degrade la granulometría de salida. Se monitoreará la variación de tamaño característico P_{80} del producto final combinado.
- Maximización de tonelaje procesado: Para el tercer escenario, el criterio principal de éxito será el diferencial de tonelaje máximo que el circuito optimizado logre procesar antes de saturar nuevamente los equipos, cuantificando así el beneficio productivo neto de la propuesta.

A partir de estos indicadores se analizarán tendencias de mejora en términos de eficiencia operativa. Finalmente, se propondrán recomendaciones operacionales aplicables a plantas con características similares, considerando las oportunidades de implementación de filtros de finos como una estrategia de optimización del circuito de chancado.

Adicionalmente, se someterá el circuito optimizado a un análisis de sensibilidad bidimensional: primero, evaluando la resiliencia electromecánica frente a variaciones en la competencia de la roca (Axb), y segundo, midiendo el impacto de caídas en la eficiencia de separación del equipo de precibado.

3.5. Metodología de Evaluación Económica

Para determinar la viabilidad del proyecto, la validación técnica obtenida a través de la simulación será complementada con una evaluación económica a nivel de ingeniería conceptual. Esta evaluación busca cuantificar el impacto financiero de la optimización propuesta frente a la de mantener el circuito en sus condiciones actuales. El análisis económico se estructura en tres etapas principales.

3.5.1 Estimación de Capital (CAPEX)

El costo de capital asociado a la adquisición e instalación del *Grizzly Feeder* y sus obras complementarias se estimará mediante el uso de información proporcionada por la empresa

colaboradora de esta memoria Valteck y factores de aproximación estándar para la industria minera, basados en el costo del equipo principal.

3.5.2 Estimación de Parámetros Operacionales (OPEX)

El diferencial de costos operativos estará determinado principalmente por la variación de consumo energetico. Para su valorización se utilizará el costo disponible de precio por MWh que está disponible en la información entregada por Valteck. Y costos de operación asociados al *Grizzly Feeder*.

3.5.3 Estimación de Beneficio

Para Cuantificar el impacto económico del tonelaje adicional procesado (escenario 3), se establecerán valores nominales conservadores basados en la información disponible para la ley del mineral y la recuperación metalúrgica (0,77 % Cu y recuperación del 91%). Se calculará la producción adicional de cobre fino anual derivada del incremento de tonelaje efectivo obtenido en la simulación.

4. Resultados

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados cuantitativos obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en el software JKSimMet 6.1 sobre el circuito de chancado planteado. La presentación de los datos se estructura de manera secuencial, comenzando con el diagnóstico de operación actual (Caso Base), seguido de la evaluación técnica de la implementación del *Grizzly Feeder* (Caso Optimizado) y terminando con la prueba de estrés del sistema para determinar el aumento de capacidad de tratamiento. Finalmente se integra una evaluación económica conceptual para determinar la viabilidad e impacto de la implementación del proyecto en el negocio minero.

4.1. Distribución Granulométrica de Alimentación

Previo a la evaluación del desempeño electromecánico del circuito de chancado, es fundamental caracterizar la distribución granulométrica del mineral ROM (Run of Mine) que ingresa al sistema. Este perfil de alimentación, validado a partir de los registros entregados por Valteck, correspondientes a un sondaje realizado a un bloque explotado destinado al chancador primario en minera los pelambres, constituye la condición de borde principal para el modelamiento en JKSimMet y es el factor que justifica la viabilidad técnica de implementar una etapa de preclasificación.

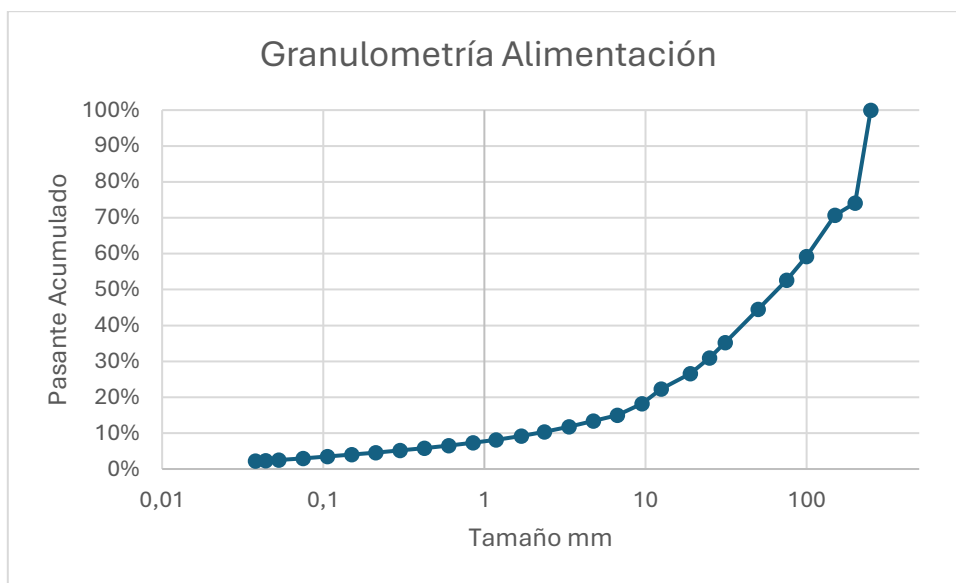


Figura 4.1 "Granulometría Alimentación"

El flujo nominal de diseño establecido para la simulación es de 1.000 TPH. Al analizar la curva de distribución de tamaño de partículas ingresada al simulador, se identifican los siguientes parámetros característicos:

- Tamaño característico (F_{80}): el 80% del mineral de alimentación presenta un tamaño inferior a 205,7 mm.
- Tamaño Máximo: la colpa de mayor tamaño que ingresa al circuito corresponde a 250 mm.
- Fracción Fina: al evaluar el tamaño de corte propuesto para el estudio (2 pulgadas o 50,8 mm), la curva granulométrica revela que aproximadamente un 44,8% del tonelaje total de alimentación ya posee un tamaño igual o inferior a esta dimensión.

Este último indicador es crítico, ya que demuestra que una fracción significativa equivalente a 448 toneladas no requiere reducción de tamaño en la etapa primaria, confirmando la pertinencia de evaluar el *Grizzly Feeder* en los escenarios posteriores.

4.2. Resultado Simulación Escenario1 (sin precibado)

En este escenario, se simuló la operación actual donde la totalidad del flujo ROM ingresa directamente a la cámara de trituración. Como caso base para la comparación de ambos.

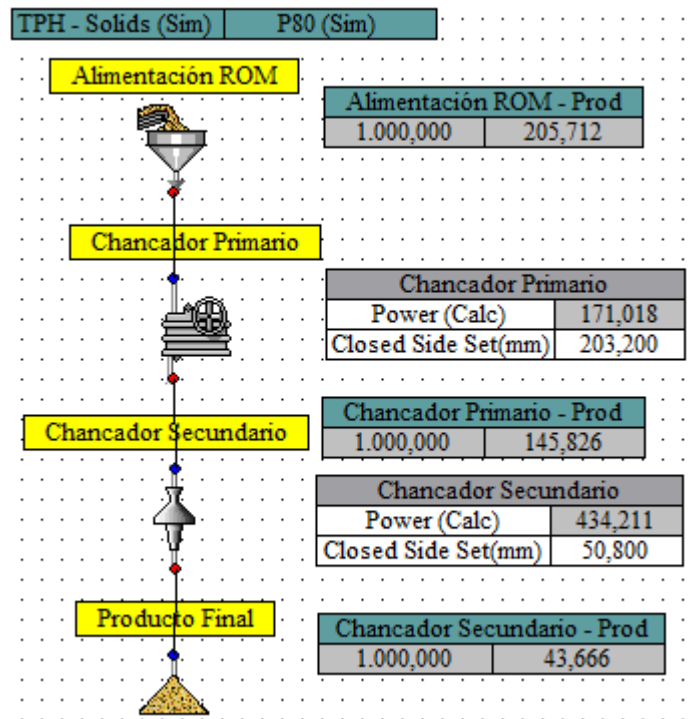


Figura 4.2 "Resultados Escenario 1"

- **Flujo de Alimentación al Chancador:** 1.000 tph.
- **Configuración (CSS):** 8 pulgadas (203,2 mm).
- **Potencia Chancador Primario:** 171,018 kWh.
- **Potencia Chancador Secundario:** 434,211 kWh.
- **Consumo Potencia Total del Circuito:** 605,229 kWh.
- **Granulometría del Producto (P_{80}):** 43,666 mm.

El Escenario 1 establece la línea base del diagnóstico operacional. La condición más relevante no es el nivel de consumo absoluto de los equipos, sino la distribución de la carga: el chancador secundario opera al 86,8% de su capacidad instalada con la totalidad del flujo ROM, lo que lo posiciona como el cuello de botella latente del circuito ante cualquier incremento de tonelaje. La fracción del 44,8% del material que ya posee un tamaño menor a 2 pulgadas al ingresar al chancador primario representa la ineficiencia central que la preclasificación busca corregir: esa masa ocupa volumen útil en la cámara de trituración sin contribuir al trabajo de fractura efectivo.

4.3. Resultado Simulación con Precibado (Grizzly a 2 pulgadas)

En este escenario, se incorporó un Grizzly Feeder con una apertura de corte de 2 pulgadas (50,8 mm) y una eficiencia de separación simulada del 77% (con un set del factor de ajuste Water Split en 80% el 77% de los finos totales inferiores a 2" son desviados)

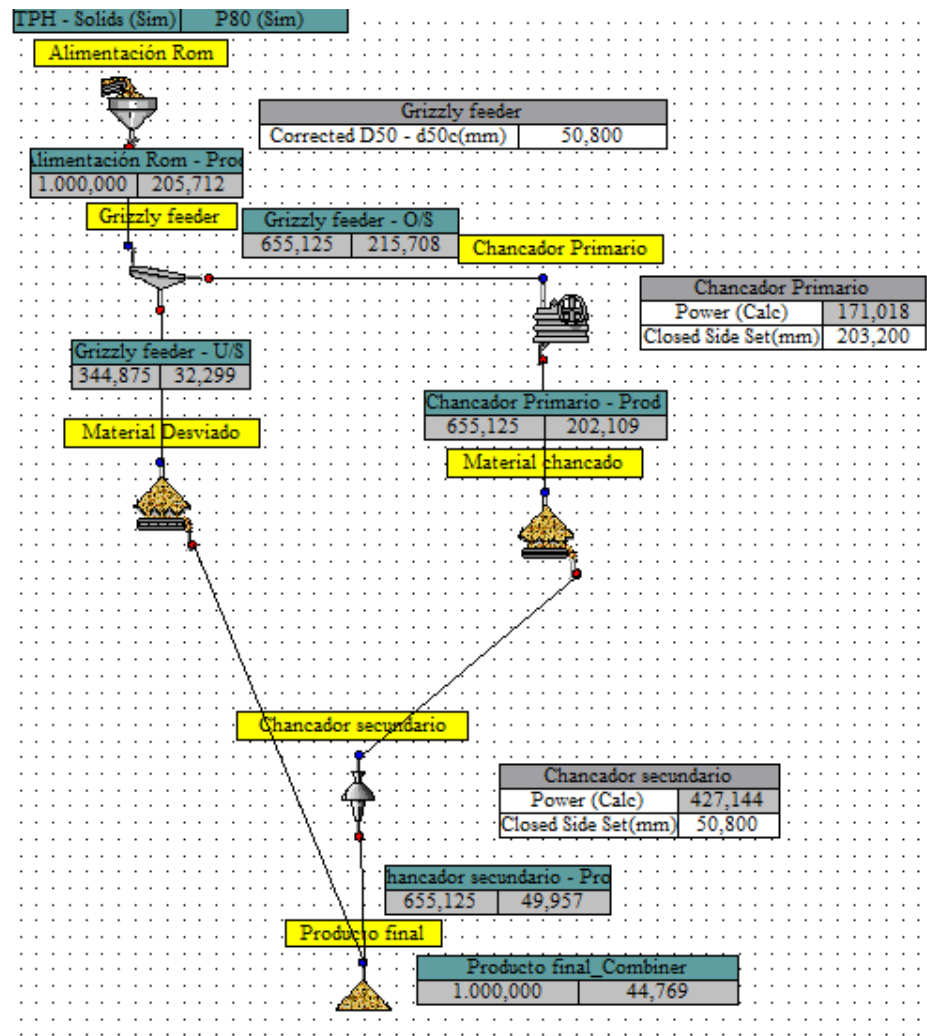


Figura 4.3 "Resultados Escenario 2"

- Flujo de Alimentación al Circuito: 1.000 tph.
- Configuración (CSS): 8 pulgadas (203,2 mm).
- Material Desviado por *Bypass*: 344,875 tph.
- Flujo Efectivo al Chancador: 655,125 tph.

- **Potencia Chancador Primario:** 171,018 kWh.
- **Potencia Chancador Secundario:** 427,144 kWh.
- **Consumo Potencia Total del Circuito:** 598,162kWh.
- **Granulometría Producto Final Combinado (P_{80}):** 44,769 mm.

El resultado más importante del Escenario 2 no es el nivel de potencia, que permanece idéntico al caso base en el chancador primario (171 kW), sino la holgura volumétrica generada: 344,9 TPH de material que ya no ocupa la cámara de trituración. Esta liberación de capacidad es el prerequisite que habilita toda la estrategia de optimización posterior. Sin embargo, el análisis también evidencia una subutilización del chancador primario: al recibir solo 655 TPH de material grueso con el mismo CSS de 8 pulgadas, el equipo entrega un producto con un P_{80} de 202 mm al chancador secundario, valor significativamente mayor a los 146 mm del caso base. Esta condición motivó el ajuste operativo del Escenario 3.

4.4. Resultado Simulación con Precibado (CSS a 7 pulgadas)

En respuesta a los resultados del escenario anterior, donde la implementación del precibado dejó subutilizado el chancador primario, se procedió a cerrar el CSS de 8 a 7 pulgadas el objetivo es que el equipo primario asuma un mayor trabajo de fractura liberando carga mecánica del chancador secundario, así lograr un balance óptimo de distribución de carga en el circuito.

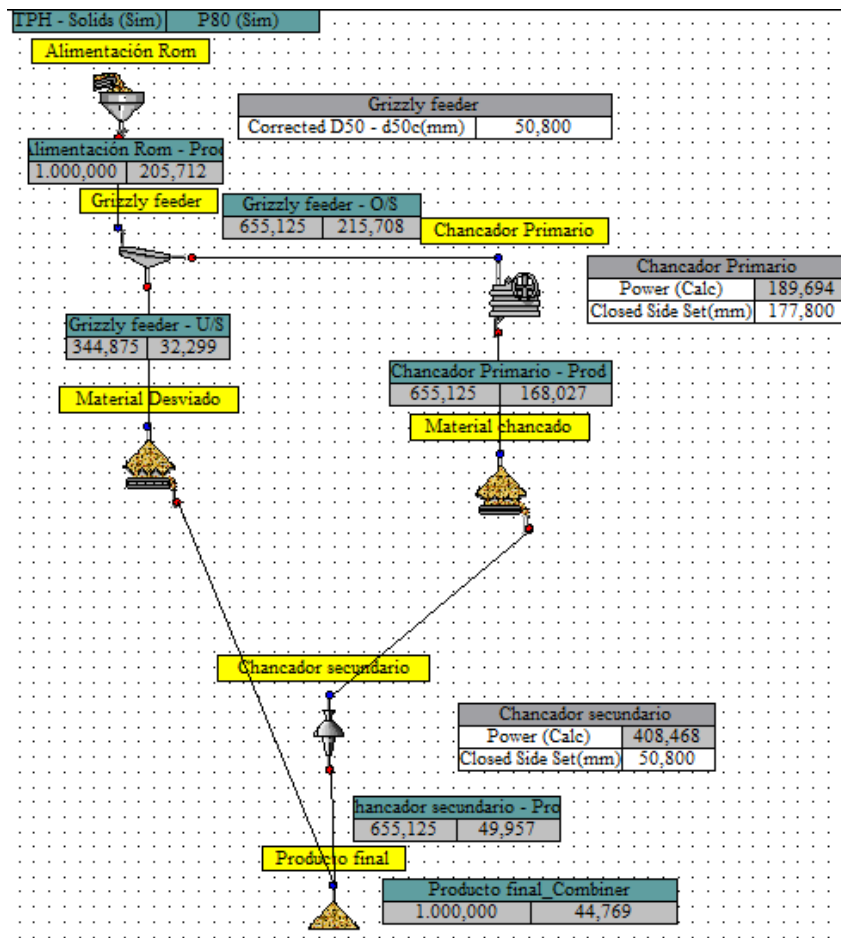


Figura 4.4 "Resultados Escenario3"

- **Flujo de Alimentación al Circuito:** 1.000 tph.
- **Configuración (CSS):** 7 pulgadas (177,8 mm).
- **Material Desviado por Bypass:** 344,875 tph.
- **Flujo Efectivo al Chancador:** 655,125 tph.
- **Potencia Chancador Primario:** 189,694 kWh.
- **Potencia Chancador Secundario:** 408,468 kWh.
- **Consumo Potencia Total del Circuito:** 598,162 kWh.
- **Granulometría Producto Final Combinado (P_{80}):** 44,769 mm.

El Escenario 3 constituye la configuración de diseño óptima del circuito optimizado. El cierre del CSS de 8 a 7 pulgadas redistribuye el trabajo de fractura entre ambas etapas: el chancador primario sube su consumo de 171 kW a 190 kW (76% de su capacidad), mientras que el

secundario reduce el suyo de 427 kW a 408 kW (82%). Esta transferencia de trabajo, sin incremento en la potencia total del circuito, es la clave operacional del proyecto: el primario asume más trabajo de conminución, el secundario se alivia, y el sistema queda en condición de absorber un incremento de tonelaje sin saturar ninguno de los dos equipos. La estabilidad del P80 en 44,77 mm confirma que esta reconfiguración no degrada la calidad del producto destinado a la molienda SAG.

4.5. Resultado Simulación con Precibado (Aumento Alimentación)

Habiendo establecido la configuración optima para el circuito, logrando holgura de potencia en ambos equipos este cuarto escenario se plantea como la prueba de estrés operacional del sistema optimizado, el objetivo de esta simulación es encontrar el límite máximo de producción sin saturar mecánicamente los equipos.

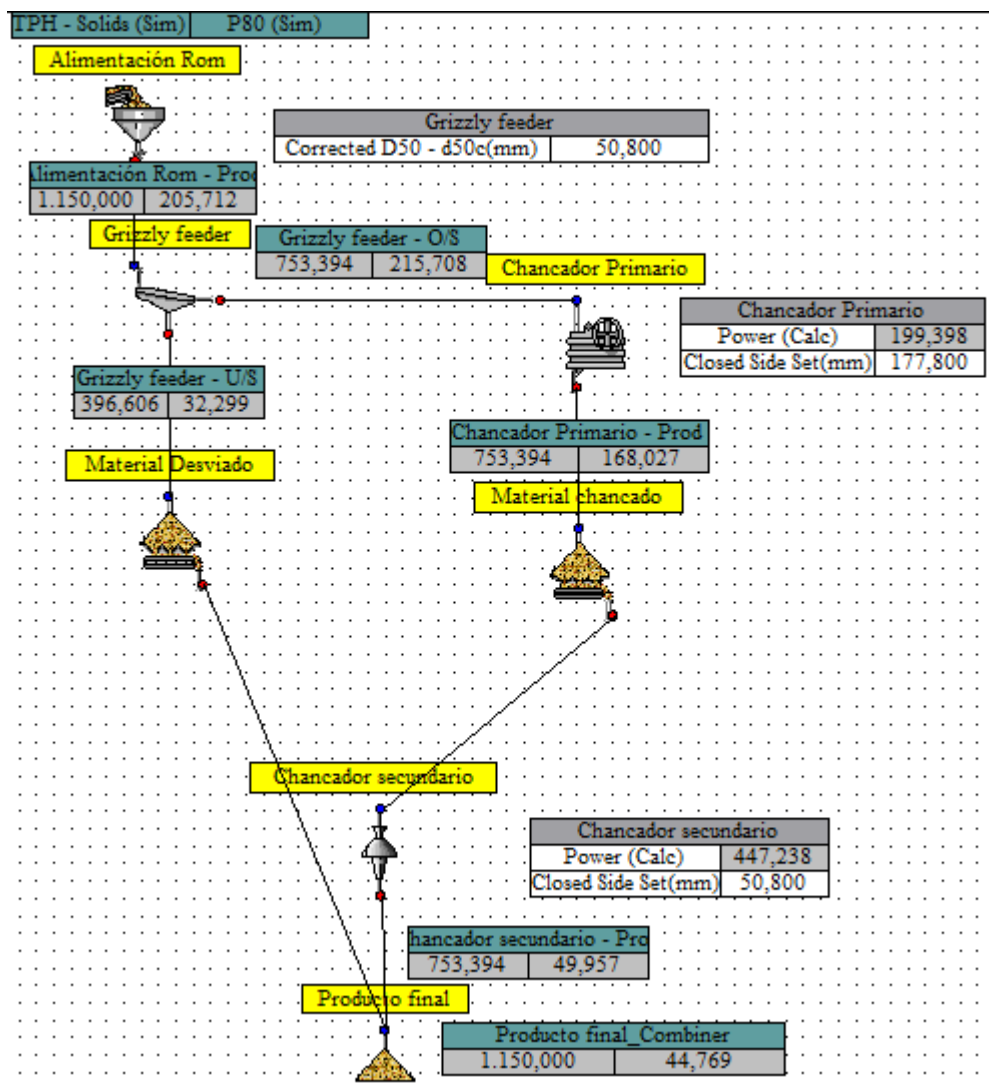


Figura 4.5 "Resultados Escenario 4"

- **Flujo de Alimentación al Circuito:** 1.150 tph.
- **Configuración (CSS):** 7 pulgadas (177,8 mm).
- **Material Desviado por Bypass:** 396,606 tph.
- **Flujo Efectivo al Chancador:** 753,394 tph.
- **Potencia Chancador Primario:** 199,398 kWh.
- **Potencia Chancador Secundario:** 447,238 kWh.
- **Consumo Potencia Total del Circuito:** 646,636 kWh.
- **Granulometría Producto Final Combinado (P_{80}):** 44,769 mm.

Para determinar el tonelaje máximo que puede ser procesado por el circuito optimizado, se adoptó un criterio de seguridad electromecánico basándonos en el Metso Screening Handbook el cual propone que una utilización apropiada de los equipos es de entre un 85 y un 90 % de su capacidad instalada, para absorber fluctuaciones de carga y evitar detenciones no programadas.

El Escenario 4 cuantifica el beneficio central de toda la estrategia: la preclasificación no fue diseñada para reducir el consumo energético del circuito existente, sino para liberar la capacidad instalada necesaria para incrementar el tonelaje total procesado. Al elevar la alimentación de 1.000 a 1.150 TPH, el Grizzly Feeder desvía 396,6 TPH de material fino, manteniendo el flujo efectivo hacia los chancadores en un nivel similar al del Escenario 3. El chancador primario opera al 79,7% de su capacidad y el secundario al 89,4%, ambos dentro de los márgenes seguros de operación establecidos por el fabricante. El consumo específico de energía se reduce a 0,562 kWh/t, confirmando que el circuito no solo produce más, sino que lo hace con mayor eficiencia energética por tonelada tratada.

4.6. Análisis Comparativo Global

Para consolidar la evaluación técnica, la Tabla 4.1 "Comparación Parámetros por Escenario" resume los indicadores clave de desempeño de los tres escenarios simulados, permitiendo cuantificar el beneficio de la preclasificación.

Tabla 4.1 "Comparación Parámetros por Escenario"

Parámetro Evaluado	Escenario 1 (Caso Base)	Escenario 2 (Grizzly a 2 Pulgadas)	Escenario 3 (Grizzly a 2 Pulgadas, CSS 7 pulgadas)	Escenario 4 (Aumento Carga)
Alimentación a Chancador Primario (TPH)	1000	1000	1000	1150
Material Desviado por Bypass (TPH)	0	344,875	344,875	396,606
Capacidad liberada en Chancador Primario (%)	0	34,5	34,5	34,5
Potencia Chancador Primario (kWh)	171,018 (68,4%)	171,018 (68,4%)	189,694 (75,8 %)	199,398 (79,7 %)
Potencia Chancador Secundario (kWh)	434,211 (86,8%)	427,144 (85,4%)	408,468 (81,6%)	447,238 (89,4%)

Potencia Total Circuito (kWh)	605,229	598,162	598,162	646,636
P_{80} Producto Final (mm)	43,666	44,769	44,769	44,769
Consumo Específico de Energía (kW/ton)	0,605	0,598	0,598	0,562

A partir de la Tabla 4.1 "Comparación Parámetros por Escenario" podemos identificar tres hallazgos principales:

Primero que la preclasificación no reduce significativamente el consumo energetico total del circuito base (diferencia de 7kW entre Escenario 1 y Escenario 3), dado que la mayor exigencia al primario al reducir el CSS compensa el alivio al secundario. Lo que nos hace notar que el verdadero valor de la preclasificación no está en el consumo energetico, sino que en la capacidad liberada para aumentar el tonelaje total del circuito.

Segundo, al ajustar el CSS del primario de 8 pulgadas a 7 pulgadas nos permite tener un balance más eficiente de potencia entre el chancado primario y el secundario ya que el primario asume un trabajo de 189 kW vs 171 kW que tenía en el escenario 2, lo que permite descargar al secundario de 434 kW a 408 kW, sin degradar el P_{80} final que se mantiene de 44,769 mm frente a los 43,666 mm del Escenario 1.

Tercero, la prueba de estrés (Escenario 4) nos muestra que el circuito optimizado puede procesar 1.150 toneladas con ambos equipos operando dentro de o en el límite máximo de su capacidad instalada, lo que representa un incremento de productividad de un 15% respecto al caso base.

4.7. Evaluación Económica

A continuación, se detalla cómo se calcularon los valores obtenidos en la evaluación económica de perfil que se realizó para determinar la viabilidad de la implementación de la preclasificación en la planta de este estudio.

4.7.1 Parámetros Económicos

Para el cálculo del flujo de caja marginal, se establecieron los siguientes parámetros operativos y de mercado de la operación que se simuló.

Incremento de productividad: 150 TPH obtenido del escenario 4.

Disponibilidad física de planta: 85%, equivalente a 7.446 horas de operación efectiva al año.

Ley de Cu promedio: 0,77% Cu.

Recuperación metalúrgica global: 91%.

Precio del cobre proyectado: 4,38 USD/lb.

Costo de energía: 0,107 USD/kW

Consumo *Grizzly Feeder*: 40 kWh

Costo de producción sin considerar subproductos: 2,38 USD/lb

Costo de producción considerando subproductos: 1,19 USD/lb

Es importante subrayar que los parámetros económicos expuestos han sido extraídos de la literatura técnica y registros industriales vigentes. Al fundamentar el análisis en costos reales de la industria, se garantiza que la rentabilidad calculada para el proyecto sea consistente con los estándares financieros del sector minero nacional.

4.7.2 Estimación CAPEX

La implementación del sistema de precibado requiere la adquisición de un *Grizzly Feeder* capaz de soportar el impacto del material ROM a 1.150 tph, además de las obras complementarias necesarias para habilitar el *bypass* del material fino hacia el producto final. Aplicando el factor de instalación estándar para minería a gran escala (Factor de Lang de 3,5), que considera obras civiles, estructuras metálicas, modificaciones a correas transportadoras y empalmes eléctricos, el CAPEX estimado se muestra en la siguiente tabla.

Ítem	Costo Estimado
<i>Grizzly Feeder</i>	450.000 US\$
Factor de Instalación (obras civiles, estructuras, chutes)	1.125.000 US\$
CAPEX Total Estimado	1.575.000 US\$

4.7.3 Estimación OPEX Diferencial

El análisis de OPEX se realiza en términos diferenciales, comparando los costos adicionales que introduce el *Grizzly Feeder* al circuito base y el aumento de consumo de los chancadores al

aumentar la producción, considerando que la diferencia de consumo entre el escenario 1 y el escenario 4 es de 41,4 kWh.

$$OPEX_{Energía\ Grizzly} = \left(40 \frac{kW}{h}\right) \times \left(7.446 \frac{h}{año}\right) \times \left(0,107 \frac{US}{kW}\right) = 31.868 \text{ US/año} \quad (10)$$

$$OPEX_{Energía\ Chancado} = \left(41,4 \frac{kW}{h}\right) \times \left(7.446 \frac{h}{año}\right) \times \left(0,107 \frac{US}{kW}\right) = 32.984 \text{ US/año} \quad (11)$$

$$\Delta OPEX = OPEX_{Energía\ Grizzly} + OPEX_{Energía\ Chancado} = 64.852 \text{ US/año} \quad (12)$$

Al contrastar los costos operativos adicionales, se observa que el OPEX diferencial derivado del consumo energético del Grizzly Feeder y el incremento en los equipos de conminución resulta ser un valor marginal (inferior al 0,1% del beneficio proyectado) dentro de la estructura de costos global de la planta. Debido a que este gasto no altera significativamente la rentabilidad del proyecto, el cálculo del Beneficio Marginal se fundamentará en los costos de producción reales reportados para Minera Los Pelambres.

4.7.4 Beneficio Marginal por Aumento de Productividad

El principal factor de beneficio de la implementación de la preclasificación es el incremento de 150 tph en la capacidad de tratamiento de la planta actual, manteniendo el P_{80} del producto según el requerimiento de la etapa posterior del proceso. El beneficio marginal anual se calcula proyectando la producción adicional de cobre fino según:

$$\Delta Producción = (\Delta TPH) \times (DF) \times (Ley\ Cu) \times (Rec) \quad (13)$$

$$\Delta Producción = (150\ TPH) \times (7.446\ h/año) \times (0,0077) \times (0,91)$$

$$\Delta Producción = 7.826\ t\ Cu\ fino\ /año$$

Valorizando la libra de cobre a 4,38 US\$/lb (Dirección de Presupuestos, 2025), lo que nos da un valor aproximado de 9.656 US\$/t, calculamos un ingreso marginal bruto de:

$$\text{Ingreso Marginal Bruto} = (\Delta \text{Ton Cu Fino}) \times (\text{Precio Metal}) \quad (14)$$

$$\text{Ingreso Marginal Bruto} = 7.826 \frac{t \text{ Cu fino}}{\text{año}} \times 9.656 \frac{\text{US\$}}{t} = 75.567.856 \text{ USD/año}$$

Si al Ingreso Marginal Bruto le restamos los costos operativos, podemos calcular el Beneficio Marginal Operacional y el Beneficio Marginal Neto de la implementación de la preclasificación. Este cálculo considera que, dado que el OPEX diferencial del equipo es marginal frente a la escala de la planta, los resultados se fundamentan en el rendimiento real de la operación. De este modo, la rentabilidad se expresa mediante las siguientes relaciones:

Beneficio Marginal Operacional: Representa la utilidad basada en el costo directo de producción de cobre, permitiendo evaluar la robustez del proyecto ante variaciones del metal base.

Beneficio Marginal Neto: Refleja la rentabilidad integral del negocio al incluir los créditos por subproductos, siendo el indicador más fiel a los estados financieros de Minera Los Pelambres.

$$\text{Beneficio Marginal Operacional} = (\text{Ingreso Marginal Bruto}) - (\text{Costo Prod. (2,38 usd/lb)}) \quad (15)$$

$$\text{Beneficio Marginal Operacional} = 75.567.856 \frac{\text{USD}}{\text{año}} - 41.063.022 \frac{\text{USD}}{\text{año}} = 34.505.834 \text{ USD/año}$$

$$\text{Beneficio Marginal Neto} = (\text{Ingreso Marginal Bruto}) - (\text{Costo Prod. (1,19 usd/lb)}) \quad (16)$$

$$\text{Beneficio Marginal Neto} = 75.567.856 \frac{\text{USD}}{\text{año}} - 20.527.598 \frac{\text{US}}{\text{año}} = 55.040.258 \text{ USD/año}$$

Dado el nivel excepcional de rentabilidad del proyecto, resulta relevante expresar el período de retorno de la inversión en términos prácticos. Contraponiendo el CAPEX total de 1.575.000 USD con el Beneficio Marginal Neto anual de 55.040.258 USD, y considerando que la planta opera con una disponibilidad del 85% (7.446 horas/año), el período de retorno simple de la inversión es de aproximadamente 10 días de operación. Este indicador refleja que, una vez implementado, el Grizzly

Feeder recupera íntegramente su costo de instalación en la primera quincena de producción, confirmando la solidez económica excepcional de la modificación propuesta.

4.8. Análisis de Sensibilidad Geometalúrgica y Límites Operacionales

4.8.1 Fundamento Predictivo y Variabilidad Litológica

La validación de cualquier optimización en un circuito de conminución requiere asegurar su representatividad frente a las condiciones geomecánicas reales y fluctuantes del yacimiento. En el caso específico de Minera Los Pelambres, los modelos avanzados de pronóstico de capacidad de tratamiento (*Throughput Forecast Models*) establecen que la competencia de la roca es la variable predictiva fundamental que rige el rendimiento volumétrico de la planta. Estos modelos demuestran empíricamente que las fluctuaciones en la dureza del mineral impactan de manera directa sobre la demanda de energía específica y, en consecuencia, sobre los límites operativos de los equipos principales.

Considerando esta variabilidad inherente, la evaluación del precibado no puede limitarse a una condición estática nominal. Para comprobar la robustez y resiliencia de la modificación propuesta, se sometieron los distintos escenarios de diseño a un análisis de sensibilidad, evaluando la respuesta traccional de los chancadores frente a tres dominios litológicos:

- **Mineral Nominal (Caso Base):** ($A \times b = 36$)
- **Mineral de Alta Competencia (Duro):** ($A \times b = 30$)
- **Mineral de Baja Competencia (Alterado):** ($A \times b = 45$)

La parametrización de estos dominios en el simulador JKSimMet se ejecutó mediante la aplicación de factores de escalamiento sobre la matriz empírica de energía de fractura, metodología cuyo desarrollo analítico se encuentra detallado en el Anexo.

4.8.2 Resultados de Simulación frente a Estrés Geomecánico

Los resultados consolidados de la demanda de potencia (kW) para los equipos de trituración primaria y secundaria, bajo las distintas configuraciones de flujo y dureza, se presentan en la Tabla 4.2 "Consumo de Potencia frente a Variabilidad Geometalúrgica"

Tabla 4.2 "Consumo de Potencia frente a Variabilidad Geometalúrgica"

Escenario Evaluado	Mineral Duro ($A \times b = 30$)	Mineral Nominal ($A \times b = 36$)	Mineral Blando ($A \times b = 45$)
Escenario 1 (Caso Base)	179,88 kW / 489,51 kW	171,02 kW / 434,21 kW	161,22 kW / 374,73 kW
Escenario 3 (Grizzly a 2 Pulgadas, CSS 7 pulgadas)	202,16 kW / 458,79 kW	189,69 kW / 408,47 kW	175,93 kW / 354,41 kW
Escenario 4 (Aumento Carga)	213,73 kW / 505,10 kW	199,40 kW / 447,24 kW	183,57 kW / 385,07 kW

Nota: Los valores se presentan en formato (Potencia Chancador Primario / Potencia Chancador Secundario).

4.8.3 Interpretación de Límites y Restricción Operativa

La evaluación paramétrica revela la alta sensibilidad traccional del circuito secundario frente a los cambios en la dureza del mineral. Al someter el circuito original (Escenario 1) a un bloque de alta competencia geomecánica ($A \times b = 30$), se observa que el chancador secundario eleva su consumo a 489,51 kW. Esto equivale a una utilización del 97,9% de su capacidad instalada, situando al equipo en una condición de riesgo inminente de detención por sobrecarga traccional (trip electromecánico).

La superioridad técnica de la implementación del precibado se evidencia al analizar la respuesta del Escenario 3 bajo esta misma condición de roca dura. Al purgar el volumen de finos incompresibles en el Grizzly Feeder y forzar al chancador primario a asumir una mayor cuota de trabajo mediante el cierre del CSS a 7 pulgadas, el primario eleva su consumo a 202,16 kW (operando de forma segura al 80,8% de su capacidad). En contraparte, esta maniobra alivia significativamente al chancador secundario, reduciendo su pico de consumo a 458,79 kW (91,7% de utilización). De este modo, la optimización propuesta dota al circuito de la resiliencia volumétrica necesaria para absorber bloques geológicos severos sin comprometer la continuidad de marcha.

El caso más restrictivo del análisis (Escenario 4 operando a 1.150 TPH con mineral de alta competencia $A \times b = 30$) merece una discusión específica, ya que define la frontera operacional del proyecto. Bajo esta combinación de máximo tonelaje y máxima dureza, el chancador secundario alcanza los 505,10 kW, equivalente al 101% de su capacidad instalada de 500 kW, condición que en operación industrial activaría el relé de protección traccional del motor y detendría el circuito. Este resultado establece una restricción operativa concreta: no es posible

operar simultáneamente a 1.150 TPH frente a un bloque de roca de alta competencia sin riesgo de detención no programada. La respuesta operacional ante esta condición debe incorporarse en el protocolo de control dinámico de la planta: al identificarse frentes de extracción con A_{xb} menor a 32, la tasa de alimentación deberá reducirse hacia las 1.000 TPH nominales para mantener la carga del chancador secundario dentro del rango seguro de operación (igual o menor al 90% de su capacidad instalada, equivalente a 450 kW). Esta restricción no invalida el proyecto, sino que delimita con precisión el rango de condiciones bajo las cuales puede explotarse el 15% de capacidad adicional.

4.9. Análisis de Sensibilidad de la Eficiencia de Precibado

4.9.1 Sensibilidad a la Eficiencia de Separación

El desempeño electromecánico del circuito optimizado no solo depende de la configuración estática de los equipos, sino que está intrínsecamente ligado a la capacidad del Grizzly Feeder para desviar de manera continua y efectiva la fracción menor a 2 pulgadas. En la práctica industrial, la eficiencia de clasificación está sujeta a factores operacionales dinámicos, tales como el desgaste del perfil de las barras, el cegamiento (blinding) de la superficie debido a la humedad del mineral ROM, y la rigurosidad del mantenimiento preventivo.

Desde la perspectiva del modelamiento fenomenológico, la eficiencia real de clasificación no es equivalente al parámetro asintótico de partición del software (Water Split), ya que las ecuaciones de clasificación penalizan probabilísticamente a las partículas cercanas al tamaño de corte (near-size). Por consiguiente, para este análisis, la eficiencia real del equipo fue cuantificada metalúrgicamente como la razón entre el flujo másico efectivamente desviado y el tonelaje total de finos disponibles en la alimentación.

Considerando que la curva granulométrica de alimentación a 1.000 TPH contiene 448,3 TPH de finos con un tamaño inferior a 2 pulgadas, se ejecutó un análisis de sensibilidad iterativo sobre el Escenario 3. Se forzó matemáticamente la partición del equipo para representar tres condiciones operativas: Operación Deficiente o Malla Cegada (60% de eficiencia real), Operación Nominal-Base (77%) y Operación Óptima mediante harnero de alta frecuencia (90%).

Tabla 4.3 "Análisis de Sensibilidad a la Eficiencia Real de Preclasificación"

Condición de la Malla	Eficiencia Calculada	Flujo Desviado por <i>Bypass</i> (TPH)	Flujo Efectivo al Chancador Primario (TPH)	Potencia Chancador Secundario (kW)	$P_{80}(\text{mm})$

Deficiente (Cegamiento / Desgaste)	60%	269	731	410,02	44,525
Nominal (Caso Base)	77%	345	655	408,47	44,769
Óptima (Alta Eficiencia)	90%	403	597	407,28	44,959

Como se observa en la Tabla 4.4, operar bajo un régimen de mantenimiento deficiente (60,1% de eficiencia) provoca que el tonelaje desviado descienda críticamente a 269,43 TPH. Esto implica que más de 178 TPH de material fino no logran ser clasificados y son arrastrados hacia la cámara del chancador primario. Al aumentar el flujo hacia la etapa primaria (730,57 TPH), se incrementa también la masa circulante que se transfiere posteriormente hacia el chancador secundario, elevando su consumo a 410,02 kW y acercándolo a la zona de riesgo operativo evidenciada en la prueba de estrés.

Por el contrario, al asegurar una eficiencia del 90% (desviando 403 TPH), se maximiza la evacuación temprana del circuito, reduciendo la masa circulante en ambas etapas de conminución. Esto demuestra que el mantenimiento de la superficie de cribado es el factor habilitador para sostener incrementos productivos.

Al profundizar en el análisis de sensibilidad de la eficiencia de preclasificación, se observa un comportamiento particular en el tamaño característico del producto final combinado (P_{80}). Cuando la eficiencia del Grizzly Feeder disminuye al 60% debido a condiciones de cegamiento o desgaste de barras, el P_{80} obtenido es de 44,525 mm. En la condición nominal de 77% de eficiencia, este indicador se sitúa en 44,769 mm, mientras que al optimizar el sistema hasta un 90% de eficiencia mediante un harnero de alta frecuencia, el P_{80} se incrementa a 44,959 mm.

Este incremento progresivo del P_{80} a medida que aumenta la eficiencia de separación responde a la dinámica de segregación de flujos del circuito. Al operar con una alta eficiencia (90%), el Grizzly Feeder logra evacuar de forma limpia una mayor cantidad de material fino natural de la alimentación (403 TPH), desviándolo directamente al producto final sin pasar por las cámaras de trituración. Esto provoca que el flujo que ingresa al circuito de chancado sea menor en masa (597 TPH) pero significativamente más grueso y competente. Como los chancadores operan con un set de abertura constante (CSS de 7" en el primario y 2" en el secundario), el producto de la descarga de los equipos mantiene un perfil granulométrico regulado por las mallas de fractura. Al realizar la mezcla final entre un flujo de bypass libre de partículas críticas y un flujo chancado proveniente de una alimentación más gruesa, la curva granulométrica combinada experimenta

un leve desplazamiento hacia tamaños mayores, reflejado en el aumento del P_{80} de 44,525 mm a 44,959 mm. Es fundamental destacar que, incluso en el escenario de máxima eficiencia y mayor tamaño de partícula (44,959 mm), el producto combinado se mantiene holgadamente por debajo del límite operacional máximo exigido para la molienda SAG, el cual está establecido en 50,8 mm (2 pulgadas), garantizando la continuidad operativa y la calidad de la alimentación aguas abajo.

4.9.2 Limitaciones del Modelo Computacional: El Efecto Packing

Durante la ejecución de las simulaciones de sensibilidad de eficiencia, se identificó una limitación estructural en los algoritmos de cálculo de JKSimMet. Al variar el volumen de finos ingresados al chancador primario (desde 596,93 TPH hasta 730,57 TPH), el software reportó un consumo de potencia estático e invariable de 189,69 kW para este equipo. Físicamente, es inviable que el motor consuma la misma energía procesando 130 toneladas adicionales por hora. Esta discrepancia radica en el modelo matricial de Andersen/Whiten utilizado por el software. Dicho algoritmo asume que cualquier partícula con un tamaño inferior a la abertura de descarga (en este caso, CSS = 7") no experimenta compresión, asignándole un trabajo de fractura nulo ($E_{cs}=0$).

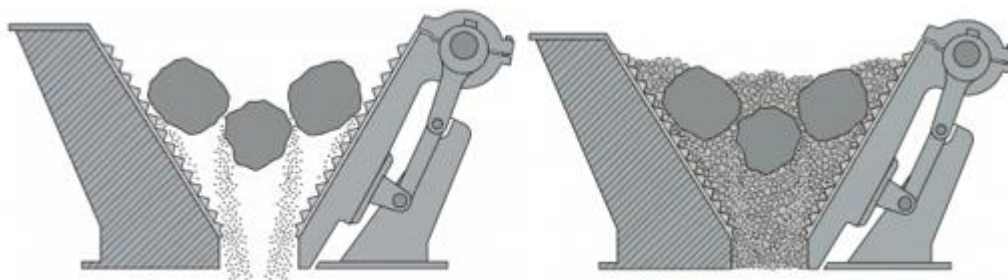


Figura 4.6 "Contraste fenomenológico en la cámara de trituración primaria: Supuesto de caída libre de finos vs. Empaquetamiento mecánico real"

Computacionalmente, el software asume que los finos atraviesan la cámara en "caída libre" sin generar fricción. En la realidad operativa de una planta minera, la reintroducción de 178 TPH de finos debido a una malla deficiente elimina la porosidad (índice de vacíos) del lecho rocoso. Este material incompresible genera un confinamiento severo conocido como packing o trituración de lecho confinado (*bed breakage*). Bajo esta condición, los componentes de la cámara (muelas y corazas) no solo deben fracturar la roca gruesa, sino que deben vencer la fricción masiva del "colchón" de finos altamente abrasivos. Esta limitación del simulador implica que los beneficios energéticos y de protección mecánica de la preclasificación son, en la realidad, considerablemente mayores a los reportados por el software. En condiciones industriales, un

Grizzly Feeder operando a baja eficiencia no mantendría el consumo del primario en 189 kW, sino que provocaría picos traccionales (spikes de potencia) que acelerarían drásticamente el desgaste de los aceros e inducirían detenciones térmicas del motor, reafirmando el carácter crítico de esta etapa en el diseño de la planta.

Es imperativo destacar que esta falencia predictiva del algoritmo de Andersen & Whiten ante altas concentraciones de finos no constituye una deducción teórica aislada de este estudio, sino que se alinea con la evidencia empírica observada en operaciones a escala industrial. Específicamente para el yacimiento de referencia, investigaciones desarrolladas por Abbott et al. (2022) y Rodríguez et al. (2023) en Minera Los Pelambres confirman que los modelos estándar de estimación de potencia y capacidad (*throughput*) carecen de la sensibilidad matemática innata para parametrizar la fracción fina en la cámara de trituración. De acuerdo con estos autores, para alcanzar una precisión aceptable en los pronósticos de planta fue estrictamente necesario introducir factores de corrección empíricos adicionales al modelo convencional (específicamente indexados al pasante a 10 mm en la alimentación), logrando así capturar las desviaciones operacionales provocadas por el empaquetamiento. La convergencia entre las limitaciones analíticas detectadas en las simulaciones de esta investigación y los ajustes requeridos en la práctica metalúrgica de Minera Los Pelambres valida metodológicamente la crítica formulada, transformando una restricción del software en un argumento fenomenológico con sólido respaldo bibliográfico.

4.10. Limitaciones Metodológicas del Estudio y Protocolo de Validación Futura

El presente estudio se enmarca en una ingeniería de nivel conceptual basada exclusivamente en simulación estacionaria, lo que impone restricciones que deben declararse explícitamente para delimitar correctamente el alcance de sus conclusiones:

Limitación 1 ausencia de ensayos de laboratorio:

Los parámetros de fractura del mineral ($A = 58$, $b = 0,62$; $A_{xb} = 36$) fueron adoptados de la base de datos bibliográfica del JKMRC para pórfidos cupríferos chilenos, ante la imposibilidad de ejecutar ensayos Drop Weight Test (DWT) específicos para el mineral del caso de estudio. Esta decisión es metodológicamente conservadora, ya que los valores adoptados se encuentran en el rango central del comportamiento reportado para yacimientos de este tipo (A_{xb} entre 28,8 y 48,7 en Minera Los Pelambres, según Rodríguez et al., 2023). Sin embargo, implica que las potencias calculadas por el simulador deben interpretarse como estimaciones de orden de magnitud y no como predicciones de alta precisión.

Limitación 2 el efecto packing no es parametrizado por el modelo:

Como se detalló anteriormente, el algoritmo matricial de Andersen/Whiten asigna trabajo de fractura nulo a partículas menores al CSS, subestimando sistemáticamente el consumo energético del chancador primario ante la presencia de finos. Esto implica que los beneficios energéticos y de protección mecánica reportados por el software son conservadores: en condiciones industriales, los ahorros reales en consumo de potencia, temperatura de rodamientos y desgaste de revestimientos serán mayores a los calculados.

Limitación 3 condición de operación estacionaria:

El modelo no evalúa perturbaciones dinámicas en tiempo real, incluyendo variaciones en la humedad del mineral ROM, desgaste progresivo de los revestimientos de los chancadores durante una campaña, ni la variabilidad granulométrica asociada a distintos frentes de extracción activos simultáneamente. Los resultados representan el comportamiento promedio del sistema bajo condiciones estables.

Limitación 4 frontera del circuito estudiado:

El análisis de flujos e impacto granulométrico abarca estrictamente desde la alimentación ROM hasta el producto de descarga del chancador secundario. El incremento de 150 TPH documentado en la prueba de estrés (Escenario 4) es factible desde la perspectiva del circuito de chancado; no obstante, su implementación operativa requiere verificar previamente que los equipos aguas abajo — en particular los molinos SAG y de bolas — dispongan de la capacidad de tratamiento necesaria para absorber ese flujo adicional. Esta verificación constituye la siguiente etapa de ingeniería básica que debe ejecutarse antes de recomendar la operación a 1.150 TPH.

Protocolo de validación futura:

Para superar las limitaciones declaradas y elevar el nivel de confianza de los resultados de simulación al nivel de ingeniería de factibilidad, se propone el siguiente protocolo de validación experimental:

1- Ensayo Drop Weight Test (DWT):

Realizar ensayos DWT sobre muestras representativas del mineral ROM del circuito estudiado, obteniendo los parámetros A y b propios de la litología específica del yacimiento. Este ensayo permitirá reemplazar los valores

bibliográficos adoptados por constantes de fractura calibradas al mineral real, mejorando la precisión de las predicciones de potencia del simulador.

2- Ensayo de chancado en laboratorio con y sin fracción fina:

Realizar pruebas de conminución en chancador de mandíbula de laboratorio procesando: (a) la granulometría ROM completa, y (b) la misma muestra con la fracción menor a 2 pulgadas retirada previamente. La comparación del consumo energético medido en ambas condiciones permitirá cuantificar empíricamente la penalización de potencia asociada al *packing*, proveyendo el factor de corrección que el modelo actual no parametriza.

La propuesta de este ensayo comparativo se sustenta en evidencia empírica documentada en la literatura técnica reciente. Fladvad y Onnela (2020) realizaron el estudio paramétrico más próximo al ensayo propuesto, comparando el consumo específico de energía de un chancador de mandíbula Nordberg C80 procesando tres granulometrías distintas, incluyendo alimentaciones con y sin fracción fina, mediante medición directa de la potencia del motor. Sus resultados demostraron que la granulometría de alimentación, y en particular la fracción fina (F10), es una de las variables de mayor influencia estadística sobre el consumo específico de energía. En la misma línea fenomenológica, Köken y Lawal (2021) demostraron mediante metodología de Superficie de Respuesta (RSM) que la cantidad de material en la cámara de trituración se asocia directamente al consumo energético, y que condiciones de exceso de carga por finos generan problemas de compresión equivalentes al efecto *packing*.

3- Simulación Computacional Avanzada mediante DEM y Acoplamiento DEM-MBD:

Como complemento a la validación empírica de laboratorio, se propone el desarrollo de un gemelo digital del chancador primario utilizando el Método de Elementos Discretos (DEM), empleando plataformas de última generación como EDEM o Rocky DEM. Dado que el modelo de balance poblacional de Andersen/Whiten utilizado en esta conceptualización es ciego ante la fricción inter-partículas y el confinamiento de material, la implementación de un modelo DEM con ruptura de partículas (como el Modelo de Reemplazo de Partícula, PRM) permitirá simular la física real del empaquetamiento (*packing*). Al integrar esta simulación con Dinámica Multicuerpo (acoplamiento bidireccional DEM-MBD), será posible evaluar la respuesta cinemática y electromecánica del equipo

ante distintos niveles de saturación por finos. Esta etapa de validación computacional avanzada tendrá como objetivo cuantificar numéricamente el factor empírico de corrección por empaquetamiento (ϕ_{bed}) y predecir los picos transitorios de potencia (spikes) que el modelo estático omite, cerrando definitivamente la brecha analítica entre la simulación estacionaria y el comportamiento dinámico real del circuito industrial.

4.11. Impacto Energético y Reducción de la Huella de Carbono

La optimización de circuitos de conminución no solo persigue maximizar la capacidad de tratamiento, sino también incrementar la eficiencia energética global del proceso, alineándose con los objetivos estratégicos de minería verde y reducción de emisiones (criterios ESG).

A partir de los balances de potencia obtenidos en el simulador JKSImMet, la implementación de la preclasificación genera dos efectos energéticos diferenciables que deben cuantificarse de manera separada: un ahorro energético a flujo constante de 1.000 TPH, y una reducción del consumo específico (kWh/t) cuando el circuito opera a su capacidad máxima de 1.150 TPH.

Ahorro energetico a flujo constante (Escenario 1 vs Escenario 3)

Al comparar el circuito base con el circuito optimizado bajo el mismo flujo nominal, la implementación del Grizzly Feeder y el ajuste del CSS a 7 pulgadas genera una reducción de potencia neta de 7,07 kW entre ambas etapas de chancado (de 605,23 kW a 598,16 kW). Si bien el chancador primario asume una mayor carga de trabajo, el alivio en el chancador secundario compensa holgadamente el balance global. Considerando una utilización efectiva de la planta del 85% (7.446 horas operativas anuales), la optimización propuesta genera un ahorro energético de 52,6 MWh al año a flujo nominal constante.

Reducción del consumo especifico (Escenario 1 vs Escenario 4)

El beneficio energético más significativo se obtiene al evaluar el consumo específico del circuito. La preclasificación permite procesar un 15% más de tonelaje con un incremento de potencia total del 6,8% (de 605,23 kW a 646,64 kW), lo que se traduce en una reducción del consumo específico de energía de 0,605 kWh/t a 0,562 kWh/t. Este delta de 0,043 kWh/t, aplicado al volumen anual

procesado en el escenario de máxima capacidad, define el ahorro energético real sobre el cual debe calcularse el impacto ambiental del proyecto:

$$Volumen\ Anual\ Procesado = 1.150\ TPH \times 7.446\ h/año = 8.562.900\ t/año \quad (17)$$

Ahorro energetico total anual derivado de la mejora en kWh/t:

$$\Delta\ energia = (0,043\ kWh/t) \times 8.562.900\ t/año = 368,2\ MWh/año \quad (18)$$

Impacto ambiental y reducción de gases efecto invernadero

Para dimensionar el impacto ambiental de esta mejora técnica, se calculó la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) equivalentes. Utilizando el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) de Chile, estimado en $0,25\ t\ CO_2\ eq/MWh$ (Ministerio de Energía, Energía Abierta, 2025), la mitigación ambiental del proyecto se define como:

$$Reducción\ Emisiones = (368,2\ MWh/año) \times 0,25\ t\ CO_2\ eq/MWh = 92,1\ t\ CO_2\ eq/año \quad (19)$$

Se concluye que la preclasificación, al habilitar un 15% de capacidad adicional sin un incremento proporcional en el consumo eléctrico, evita la emisión de aproximadamente 92,1 toneladas de CO_2 equivalente al año hacia la atmósfera. Este beneficio ambiental actúa como un valor añadido a la rentabilidad operativa del proyecto, demostrando que la preclasificación es una estrategia de ingeniería sustentable que reduce tanto el costo por tonelada procesada como la huella de carbono de la operación.

4.12. Impacto Operacional: Reducción de OPEX por Menor Desgaste de Aceros

La implementación del *Grizzly Feeder* de preclasificación no solo optimiza el balance termodinámico y protege la capacidad de tratamiento, sino que genera un beneficio económico directo y tangible en los Costos Operativos (OPEX) de la planta, específicamente en la partida de consumo de elementos de desgaste (aceros).

Como se detalló en la evaluación fenomenológica, la introducción de mineral ROM sin preclasificar a la cámara de trituración primaria induce la saturación de los espacios de vacíos, generando el fenómeno de empaquetamiento (*packing*). Bajo esta condición de lecho confinado, las partículas finas actúan como un agente altamente abrasivo. Durante los ciclos de compresión de la mandíbula, este colchón de finos incompresibles somete a los revestimientos de acero al manganeso a un desgaste severo por abrasión, acelerando su degradación física.

De acuerdo con la literatura especializada en la optimización de circuitos de chancado (Nesans, 2025), la remoción anticipada de la fracción fina mediante sistemas de escalpe evita la fricción parásita dentro de la cámara, constituyendo el factor de mayor impacto para extender la vida útil de los revestimientos. Al procesar únicamente el material grueso que estrictamente requiere conminución, las fuerzas de compresión se aplican directamente sobre la roca, minimizando el desgaste por cizalle del material particulado contra las paredes metálicas.

En el circuito optimizado (Escenario 3), la desviación efectiva de 344,88 TPH de material inferior a 2 pulgadas impide que esta masa fina y abrasiva friccione internamente el chancador primario. Esta mejora mecánica impacta favorablemente el OPEX del circuito bajo dos mecanismos principales:

- 1- Reducción de Costos Directos: Disminución en la frecuencia de compra y reposición de revestimientos de acero de alta aleación.
- 2- Incremento de disponibilidad: Al prolongarse la vida útil de los componentes, se distancian las detenciones de planta programadas para el mantenimiento mayor (cambio de revestimientos), aumentando la utilización efectiva del activo y el tonelaje total procesado anualmente.

4.12.1 Estimación Económica Referencial de Ahorro en Aceros

Para dimensionar el impacto financiero de esta optimización, se desarrolló una estimación de orden de magnitud basada en el volumen de material abrasivo retirado de la cámara de trituración.

Considerando el régimen operativo nominal (1.000 TPH a 90% de utilización, equivalente a 7.446 horas/año), el equipo clasificador logra desviar un flujo constante de 344,88 TPH. Esto equivale a una masa anual de finos purgados de:

$$Masa\ Desviada = (344,88\ t/h) \times 7.446\ h / año = 2.567.976\ t / año \quad (20)$$

Si este material hubiese ingresado al chancador primario, habría generado un empaquetamiento abrasivo. Para efectos de este cálculo, se asume una tasa de desgaste parásito conservadora de 10 gramos de acero por tonelada de fino empaquetado (10 g/t), de acuerdo con los rangos teóricos de abrasión para pórfidos cupríferos (Wills & Finch, 2015). Asimismo, se considera un costo estándar de reposición para revestimientos de acero al manganeso de 4,0 USD/kg, valor referencial sustentado en las bases de estimación de costos operacionales para gran minería (CostMine, 2024).

Bajo estos parámetros, el ahorro anual por concepto de menor consumo de aceros de desgaste se calcula de la siguiente manera:

$$Acero\ Evitado = \frac{\left(2.567.976 \frac{t}{año}\right) \times 10\ g/t}{1.000.000 \frac{g}{t} t_{acero}} = 25,67\ t / año \quad (21)$$

$$Ahorro\ Acero = 25,67 \frac{t_{acero}}{año} \times 4.000\ USD / t_{acero} = 102.680\ USD/año \quad (22)$$

Se concluye que la inclusión de la etapa de preclasificación genera un ahorro directo estimado en más de 100.000 USD anuales solo por concepto de mitigación de desgaste en el chancador primario. Este beneficio económico, sumado a las 13,9 toneladas de CO_2 evitadas y la habilitación de un 15% extra de capacidad de tratamiento productivo continuo, justifica contundentemente la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto.

4.13. Impacto Operacional y Beneficios de la Preclasificación a Flujo Nominal Constante

Los resultados de simulación presentados en el Capítulo 4 fueron obtenidos bajo el supuesto operativo prioritario de incrementar la capacidad de tratamiento hasta 1.150 TPH. Sin embargo, es metodológicamente necesario examinar el valor técnico y económico de la preclasificación bajo un escenario alternativo: aquel en que la planta decide mantener el tonelaje nominal de 1.000 TPH, ya sea por restricciones de capacidad en los equipos de molienda aguas abajo o por razones de política operacional. En este contexto, los beneficios de la instalación del Grizzly Feeder no se expresan a través del incremento de tonelaje, sino mediante la protección del activo, la extensión de la vida útil de componentes críticos y la mejora de la confiabilidad electromecánica del equipo.

4.13.1 Erradicación del Mecanismo de Abrasión de Tres Cuerpos y Extensión de la Vida Útil de Revestimientos

El mecanismo dominante de desgaste en la cámara de un chancador de mandíbula sin preclasificación es la abrasión de tres cuerpos, concepto que describe la interacción simultánea entre una partícula gruesa sometida a compresión, el material fino incompresible atrapado en los espacios vacíos del lecho, y la superficie metálica del revestimiento de acero al manganeso (Wills & Finch, 2015). Bajo esta condición, las partículas finas actúan como un agente abrasivo de tercera fase que genera micro-corte, micro-surcado y agrietamiento superficial en la capa de trabajo del revestimiento. Esta degradación no se localiza en la zona de mayor compresión del equipo, sino que se extiende hacia las secciones superiores de la mandíbula, las cuales, en condiciones normales de operación con alimentación limpia, exhiben un desgaste mínimo (Nesans, 2025).

La Figura 4.6 del presente estudio ilustra con precisión la diferencia fenomenológica entre el supuesto del modelo matemático (partículas finas en caída libre sin fricción) y la realidad operativa: un lecho confinado saturado donde los finos rellenan el índice de vacíos de la cama rocosa. Esta saturación transforma el régimen de compresión en un confinamiento severo. El propio fabricante del chancador primario de referencia (Metso Nordberg C160) reconoce explícitamente este efecto en su catálogo técnico, donde las tablas de capacidad presentan dos columnas diferenciadas (con y sin finos en la alimentación) y establece que la presencia de material sub-CSS en la cámara incrementa la demanda de potencia, deteriora el perfil de desgaste de los revestimientos y reduce el tonelaje efectivo procesado (Metso, 2020). Adicionalmente, la guía técnica de Sandvik para su línea de chancadores de mandíbula establece de forma explícita que los equipos son dimensionados para los motores especificados en sus tablas de referencia técnica, y que la operación con mineral de mayor dureza o con exceso de finos obliga a aumentar el CSS para evitar la sobrecarga del motor, añadiendo que el incumplimiento de esta condición puede resultar en daños mecánicos severos no cubiertos por garantía (Sandvik, 2019).

En contraste, cuando la preclasificación elimina la fracción sub-tamaño de la alimentación, las fuerzas de compresión actúan directamente entre la partícula gruesa y la superficie del revestimiento, constituyendo un mecanismo de abrasión de dos cuerpos. Este régimen es fundamentalmente menos destructivo: las fuerzas de compresión se transmiten de forma puntual y controlada a través del contacto directo roca-acero, sin el efecto multiplicador de la fase abrasiva intersticial. Fabricantes de soluciones de scalpe industrial (Nesans, 2025) reportan que la abrasión de tres cuerpos incrementa la tasa de desgaste entre un 40 y un 70% respecto al

régimen de dos cuerpos bajo compresión directa, y que la vida útil de los revestimientos de mandíbula operando con alimentación sin preclasificación oscila entre 1.800 y 3.200 horas, reduciéndose en un 40 a 50% respecto a la vida esperada con alimentación escalpeada (3.200 a 4.000+ horas). La guía operacional de Metso (2020) confirma este principio, listando entre los beneficios directos del scalping en chancado primario: mejora en el perfil de desgaste de los revestimientos, mayor vida útil y menor riesgo de packing.

En términos económicos, para el circuito evaluado en este estudio, la reducción del mecanismo de desgaste más destructivo tiene consecuencias directas sobre el OPEX de la operación. En el Escenario 3 (1.000 TPH con preclasificación), el Grizzly Feeder desvía 344,9 TPH de material fino de forma permanente. Proyectando esta masa sobre la disponibilidad efectiva de la planta (7.446 h/año), se obtiene una masa anual de finos purgados de 2.567.976 t/año que deja de interactuar abrasivamente con los revestimientos del primario. Aplicando una tasa de desgaste parásito conservadora de 10 g por tonelada de fino empaquetado, consistente con los rangos teóricos de abrasión de tres cuerpos para pórfidos cupríferos (Wills & Finch, 2015) y considerando un costo de reposición de 4,0 USD/kg para acero al manganeso de alta aleación (CostMine, 2024), el ahorro directo estimado en consumo de aceros supera los 100.000 USD anuales. Este cálculo no incluye el beneficio indirecto de mayor disponibilidad física: al distanciarse las paradas programadas de mantenimiento mayor para cambio de revestimientos, la planta acumula horas adicionales de operación productiva por campaña, incrementando el tonelaje anual procesado incluso sin modificar la tasa de alimentación.

4.13.2 Eliminación del Packing como Factor Mitigador de Picos Traccionales y Protección Electromecánica del Motor

El análisis de la Sección 4.9.2 demostró que el modelo matricial de Andersen/Whiten asigna trabajo de fractura nulo a las partículas sub-CSS y, por tanto, reporta un consumo de potencia estático e invariable para el chancador primario independientemente de la fracción de finos en la cámara. Esta limitación computacional implica que los picos traccionales (*power spikes*) asociados al efecto packing son fenómenos que el simulador es estructuralmente incapaz de predecir. Sin embargo, en la operación industrial real, el empaquetamiento del lecho genera episodios de compresión confinada que se traducen en sobrecargas traccionales transitorias del motor, reconocidas en la literatura técnica como una de las causas principales de detenciones no programadas en chancado primario (Wills & Napier-Munn, 2006). Las propias especificaciones técnicas de Metso para los chancadores de la Serie C señalan que los equipos incorporan protección de sobrecarga automática mediante cilindros hidráulicos, dispositivos que se activan ante presiones excesivas en la cámara para permitir la apertura del CSS y liberar el atasco,

precisamente el escenario que el packing produce de forma periódica cuando la alimentación contiene alto contenido de finos incompresibles (Wills & Napier-Munn, 2006).

En la práctica minera, los picos de potencia inducidos por packing producen dos tipos de consecuencias electromecánicas: en el corto plazo, la activación del relé de protección traccional del motor, que interrumpe el circuito y requiere un ciclo de reinicio y verificación; en el largo plazo, el ciclado térmico de los rodamientos principales del eje excéntrico debido a las fluctuaciones periódicas de carga, mecanismo que acelera la fatiga de los elementos rodantes y reduce la vida útil del sistema de transmisión. El monitoreo de la demanda de potencia como indicador predictivo de estos eventos es una práctica reconocida en la industria, donde picos súbitos en el consumo de potencia son señal de incremento de fricción o problemas mecánicos emergentes que requieren investigación inmediata (Acoem, 2025; Zoneding, 2025).

La instalación del Grizzly Feeder elimina estructuralmente la causa raíz de los picos traccionales al impedir el ingreso del material incompresible a la cámara. La energía de compresión aplicada por la mandíbula actúa entonces de forma selectiva y eficiente sobre roca competente, generando un régimen de carga estable y predecible. Este comportamiento se refleja directamente en los indicadores de confiabilidad del activo: una mayor disponibilidad física, ciclos de mantenimiento más predecibles y menor frecuencia de intervenciones de emergencia. Ramli et al (2019) cuantifican este efecto al reportar que la remoción de hasta un 30-35% del tonelaje de alimentación mediante escalpe reduce significativamente la variabilidad operacional del chancador primario y disminuye las detenciones no programadas asociadas al fenómeno de packing. En el mismo sentido, fabricantes como Weir Minerals (2023) y Metso (2020) coinciden en que el precibado mejora la estabilidad operacional al evitar la sobrecarga volumétrica del equipo, lo que se traduce en una mayor regularidad del circuito.

En síntesis, para el escenario operativo de 1.000 TPH sin aumento de tonelaje, el valor económico del Grizzly Feeder se concentra en la protección del activo y la mejora de la confiabilidad: extensión de la vida útil de revestimientos por erradicación de la abrasión de tres cuerpos, eliminación de los picos traccionales que gatillan paradas de emergencia y reducción del consumo específico de energía de 0,605 a 0,598 kWh/t. Estos beneficios, aunque de menor magnitud que el incremento de capacidad del Escenario 4, representan mejoras operacionales reales y cuantificables que justifican la inversión incluso cuando el objetivo estratégico de la empresa sea la reducción de costos de mantención antes que el crecimiento del tonelaje.

4.14. Limitaciones Fenomenológicas del Modelo Matricial y Tecnologías Avanzadas para la Simulación del Efecto Packing

4.14.1 Por qué el Modelo de Balance Poblacional Falla ante Cámaras Saturadas de Finos

El modelo matemático que gobierna la simulación del chancador de mandíbula en JKSImMet V6.1 es el modelo matricial de Andersen/Whiten, cuya formulación fue desarrollada inicialmente por Whiten (1973) y posteriormente refinada por Andersen y Napier-Munn (1988, 1990). Este modelo pertenece a la familia de los *Population Balance Models* (PBM) o modelos de balance poblacional, que constituyen la columna vertebral de la mayoría de los simuladores de procesos de conminución de uso industrial, incluyendo JKSImMet y MolyCop Tools (Doll, 2018). La ecuación fundamental del modelo representa el chancador como un reactor de mezcla perfecta donde ocurren ciclos repetitivos de clasificación interna y fractura, descritos matricialmente como:

$$P = (I - C) \cdot (I - C \cdot B)^{-1} \cdot F \quad (23)$$

En esta formulación, la matriz de clasificación C es el elemento central de la limitación estructural: define la probabilidad de que una partícula de tamaño i sea descargada sin sufrir fractura adicional, y esta probabilidad depende exclusivamente de la relación entre el tamaño de la partícula y la abertura de descarga CSS del equipo (Whiten, 1973; Napier-Munn et al., 1996). El algoritmo asigna a toda partícula con un diámetro inferior al CSS una probabilidad de clasificación equivalente a la unidad, es decir, certeza de descarga sin fractura, en consecuencia, un trabajo de fractura específico E_{cs} igual a cero. Bajo esta lógica matemática, las partículas finas sub-CSS "atravesan" la cámara sin interactuar energéticamente con los componentes del equipo ni con las partículas que las rodean.

Esta suposición es físicamente correcta en el caso ideal de una cámara con baja fracción de finos, donde las partículas pequeñas pueden efectivamente percolar a través de los espacios entre los fragmentos gruesos y llegar a la abertura de descarga sin ser comprimidas. Sin embargo, la suposición colapsa como descriptor de la realidad cuando la fracción de finos supera un umbral crítico de relleno del índice de vacíos del lecho rocoso. Investigaciones sobre compresión confinada de lechos de partículas mediante DEM han demostrado que con tan solo un 15% de relleno de los vacíos por finos, las partículas gruesas quedan ancladas entre sí, pero a mayores fracciones de finos, el lecho se vuelve más compacto y homogéneo, redistribuyendo las fuerzas de compresión y reduciendo la efectividad de la fractura de las partículas gruesas (Simulating a laboratory-scale cone crusher, 2020). En el caso del circuito evaluado, donde la

alimentación ROM contiene un 44,8% de material sub-2" y la eficiencia de preclasificación del escenario de malla deficiente permite que hasta 178 TPH de finos ingresen al chancador primario, el fenómeno de empaquetamiento es inevitable y la suposición de "caída libre sin fricción" del modelo pierde toda validez física.

La consecuencia directa de esta limitación es la subestimación sistemática del consumo energético del chancador primario ante la presencia de finos, tal como se evidenció en los resultados del análisis de sensibilidad de la Sección 4.9: al variar la fracción de finos ingresada desde 597 TPH hasta 731 TPH, JKSimMet reportó un consumo de potencia estático e invariable de 189,69 kW. Esta incapacidad del modelo para capturar el comportamiento real ha sido identificada en la literatura especializada: Tavares et al. (2009) señalan que los modelos de balance poblacional tradicionales han sido ampliamente exitosos para describir la reducción de tamaño en condiciones estables, pero presentan limitaciones fundamentales para escalar desde información de laboratorio y para representar la influencia de la distribución de tamaños de la alimentación sobre el trabajo mecánico real del equipo. En el contexto específico de Minera Los Pelambres, esta limitación fue reconocida empíricamente por Rodríguez et al. (2023) y Abbott et al. (2022), quienes debieron incorporar términos correctivos específicos para la fracción de finos a los modelos de pronóstico de capacidad, precisamente porque los modelos estándar de potencia no parametrizaban la penalización energética asociada al contenido de finos en la alimentación.

4.14.2 El Método de Elementos Discretos (DEM) y su Acoplamiento con Dinámica Multicuerpo (MBD) como Solución al Estado del Arte

La herramienta que la ingeniería de conminución ha desarrollado para superar las limitaciones estructurales de los modelos de balance poblacional ante condiciones de lecho confinado es el Método de Elementos Discretos (*Discrete Element Method*, DEM). Propuesto originalmente por Cundall y Strack (1979), el DEM es una metodología de simulación numérica basada en la física newtoniana que modela el movimiento individual de cada partícula en el sistema, integrando las ecuaciones de movimiento traslacional y rotacional para cada elemento a lo largo del tiempo. A diferencia de los modelos matriciales de balance poblacional, el DEM no requiere suponer un comportamiento ideal para las partículas sub-tamaño: cada partícula interactúa con sus vecinas y con las superficies metálicas del equipo a través de modelos de contacto, típicamente Hertz-Mindlin, que calculan fuerzas normales y tangenciales en función de la deformación elástica en cada punto de contacto (Cleary & Sinnott, 2015; Barrios et al., 2020).

La capacidad del DEM para modelar la fricción inter-partículas, el confinamiento y la compresión de lecho es precisamente lo que lo diferencia de los PBM para la simulación del efecto packing. En una cámara de chancado con alto contenido de finos, el DEM puede representar cómo cada partícula pequeña transfiere fuerzas de contacto a las partículas vecinas y a las superficies de los revestimientos, cuantificando el coeficiente de fricción efectivo del lecho saturado y la distribución real de tensiones de contacto sobre la mandíbula. Cleary et al. (2017) aplicaron simulaciones DEM con partículas no esféricas y ruptura de partículas a un chancador de cono industrial, demostrando que el modelo es capaz de predecir con precisión el flujo de material, la distribución granulométrica del producto y las zonas de desgaste de los revestimientos bajo distintas condiciones de material y operación. Este estudio constituyó una de las primeras demostraciones a escala industrial de que el DEM supera cualitativamente la capacidad predictiva de los PBM ante condiciones de operación variables.

Para la inclusión de ruptura de partículas dentro del entorno DEM (requisito para simular chancadores de compresión) se utilizan principalmente tres enfoques: el Modelo de Partícula Ligada (*Bonded Particle Model*, BPM), el Modelo de Ruptura Rápida (*Fast Breakage Model*, FBM) y el Modelo de Reemplazo de Partícula (*Particle Replacement Model*, PRM). De estos, el PRM es el más ampliamente aplicado en la simulación de equipos de compresión, y sus implementaciones más avanzadas, como el modelo de Tavares, disponible en los paquetes comerciales EDEM (Altair Engineering) y Rocky DEM (Ansys/ESSS), incorporan variabilidad y dependencia del tamaño en la probabilidad de ruptura, debilitamiento de partículas por esfuerzos repetidos y distribuciones de tamaños de fragmentos calibradas con datos de ensayos de laboratorio (DWT) (Tavares et al., 2021; André & Tavares, 2020). Barrios et al. (2020) validaron el PRM implementado en EDEM para un chancador de mandíbula de laboratorio procesando un mineral de oro, logrando muy buena concordancia entre las predicciones de la simulación y los resultados experimentales en términos de tonelaje, distribución granulométrica del producto, fuerza de compresión sobre las mandíbulas y consumo energético en función del CSS y la frecuencia de operación.

El segundo avance del estado del arte relevante para este estudio es el acoplamiento DEM-MBD (*Discrete Element Method – Multi-Body Dynamics*). El enfoque DEM puro modela con precisión el comportamiento de las partículas, pero asume que los componentes estructurales del equipo son cuerpos rígidos con cinemática predefinida. El acoplamiento bidireccional DEM-MBD supera esta limitación al permitir que las fuerzas ejercidas por el lecho de partículas sobre las superficies del equipo retroalimenten de forma dinámica el modelo cinemático del equipo, modificando en tiempo real las posiciones y velocidades de los componentes móviles en respuesta a las cargas

del material (DEM Solutions / Altair, 2013). En el contexto de chancadores, este acoplamiento es fundamental para simular correctamente la respuesta hidráulica de los sistemas de protección de sobrecarga (CSS variable bajo carga) y la variación dinámica de la brecha de descarga ante picos de carga, precisamente los fenómenos que el packing genera y que el modelo de Andersen/Whiten no puede capturar. Rodriguez et al. (2021, 2022) demostraron que simulaciones DEM-MBD-PRM de HPGRs a escala piloto en EDEM predijeron con excelente concordancia tanto el tonelaje como el consumo de potencia de los equipos reales, validando la capacidad de esta metodología para capturar la respuesta dinámica de la máquina ante el comportamiento del lecho de partículas confinado.

Los dos paquetes de software comerciales que lideran la implementación de DEM con ruptura de partículas para aplicaciones de conminución son Rocky DEM (desarrollado originalmente por ESSS en Brasil, actualmente parte del portafolio de Ansys) y EDEM (Altair Engineering, anteriormente DEM Solutions). Rocky DEM se ha destacado en la simulación de chancadores de mandíbula con mineral de hierro mediante el modelo de Tavares, logrando predicciones validadas de potencia y distribución granulométrica (Arruda Tino & Tavares, 2022; de Arruda Tino & Tavares, 2025). EDEM, por su parte, incorpora una interfaz de acoplamiento MBD nativa que permite la co-simulación bidireccional con paquetes de dinámica multicuerpo como MSC Adams, Siemens LMS Virtual.Lab y MathWorks Simulink (DEM Solutions, 2013; Altair, 2022), lo que lo posiciona como la herramienta más completa para simular la respuesta dinámica completa de un chancador ante un lecho saturado de finos. La revisión reciente de Li et al. (2024) confirma que el DEM se ha consolidado como la herramienta de elección para superar las limitaciones de los modelos empíricos en la predicción de parámetros operacionales y tasas de desgaste en equipos de conminución.

La incorporación de simulaciones DEM o DEM-MBD al protocolo de validación futura propuesto en la Sección 4.10 permitiría cuantificar empíricamente el factor de corrección ϕ_{bed} que el modelo de Andersen/Whiten omite: la penalización energética del chancador primario como función de la fracción de finos en la cámara. Este factor, que en la realidad industrial se expresa como picos de potencia transitorios y aumento sostenido del consumo base, es la pieza de información que elevaría el nivel de confianza de las predicciones de este estudio desde la ingeniería conceptual hacia la ingeniería básica con respaldo experimental.

4.15. Interpretación de los resultados

Las simulaciones realizadas son concluyentes respecto al impacto operativo de la preclasificación y la reconfiguración del circuito. El análisis de datos extraídos de la Tabla 4.1 "Comparación Parámetros por Escenario" permite identificar tres grandes áreas de optimización:

4.15.1 Alivio Operacional y Descongestión

La incorporación del *Grizzly Feeder* a 2 pulgadas demuestra una eficiencia de separación buena. A un flujo nominal de 1.000 tph, el equipo logra desviar 344,88 tph de finos directamente al producto final. Esto implica que el chancador primario experimenta una reducción inmediata de del 34,5 % de carga en su alimentación volumétrica. Al evitar el ingreso de este material se elimina el efecto de *packing* en la cámara de trituración, condición que según Flavad & Onnela (2020), genera ineficiencia energética y desgaste prematuro de revestimientos, permitiendo que las fuerzas de compresión actúen de manera efectiva solo sobre la roca competente y no sobre la que ya cumple con la granulometría requerida.

La reducción de carga efectiva sobre el chancador primario libera volumen útil en la cámara, permitiendo al equipo operar con mayor eficiencia de compresión sobre la fracción a tritura. Este alivio es el prerrequisito operacional que habilita la posterior prueba de estrés a 1.150 TPH.

4.15.2 Análisis Energetico y Electromecánico

El seguimiento del consumo de potencia revela el mecanismo de optimización del circuito. En el caso base (Escenario1), la etapa de chancado secundario operaba con un nivel de exigencia alto (434 kW equivalentes al 87% de su motor). Al implementar la preclasificación y cerrar el CSS del chancador primario a 7 pulgadas (Escenario3), se logró transferir el trabajo de fractura hacia la etapa de chancado primario (la cual subió su consumo a 189 kW) aliviando de manera directa el chancador secundario, cuyo consumo descendió a 408 kW (81,6%) este balance de carga es la clave que nos permite optimizar la planta.

Además, al evaluar el consumo específico de energía en la prueba de estrés a 1.150 (Escenario 4), se comprueba la mejora en la sustentabilidad del proceso bajando de 0,605 kW/t a 0,562 kW/t. Lo que nos indica que la preclasificación y el ajuste de CSS no solo nos permitió producir más, sino que redujo el consumo energetico en un 7%, lo que nos confirma que, aparte de producir más, lo hace de manera más eficiente.

4.15.3 Calidad de Producto P_{80}

Dado que el circuito de chancado primario y secundario actúa como el proveedor directo de materia prima para el proceso de molienda SAG, es un requisito operacional estricto que los

incrementos en la tasa de tratamiento total no degraden la granulometría de la descarga combinada. En el Caso Base (Escenario 1), operando sin preclasificación, el tamaño característico del producto (P_{80}) se situó en 43,666 mm. Con la introducción del Grizzly Feeder y la subsecuente reconfiguración operativa del circuito, el análisis de sensibilidad dinámico revela que el P_{80} final combinado experimenta sutiles variaciones en función directa de la eficiencia de separación del equipo de escalpe.

Específicamente, al evaluar un régimen de operación deficiente o con mallas parcialmente cegadas (60% de eficiencia real de preclasificación), el P_{80} combinado del circuito se reduce a 44,525 mm. En la condición nominal de diseño (77% de eficiencia real), el indicador se estabiliza en 44,769 mm. Por último, al optimizar el sistema mediante tecnologías de alta frecuencia para alcanzar una separación óptima (90% de eficiencia real), el tamaño característico experimenta un leve incremento ascendente, posicionándose en 44,959 mm.

Este incremento progresivo del P_{80} combinado a medida que aumenta la eficiencia del Grizzly Feeder responde de forma coherente a la fenomenología de segregación másica del circuito y a los fundamentos del modelo matricial de Andersen & Whiten. Al operar con una alta eficiencia (90%), el clasificador purga tempranamente del circuito una masa sustancial de material fino natural (403,07 TPH), desviándola por bypass directo hacia el flujo de producto final combinado. Esto provoca que la fracción que ingresa efectivamente a la cámara de trituración del chancador primario sea volumétricamente menor, pero significativamente más gruesa y competente.

Dado que el set de abertura por el lado cerrado (CSS) del chancador secundario de cono se mantiene fijo y constante en 2 pulgadas (50,8 mm) en todas las simulaciones para salvaguardar el tamaño máximo de alimentación aguas abajo, la distribución de tamaños de la roca efectivamente fracturada queda rígidamente acotada por las matrices de selección y funciones de rotura del algoritmo matemático. Al realizarse la recombinación final entre un flujo de bypass libre de partículas cercanas al tamaño de corte y un flujo chancado proveniente de una alimentación intermedia más gruesa, la curva granulométrica global combinada sufre un desplazamiento marginal hacia la zona de fragmentos mayores.

Desde la perspectiva del proceso global, este comportamiento demuestra que una alta eficiencia en la preclasificación limpia de manera efectiva la cámara de trituración, permitiendo que las fuerzas de compresión actúen de forma selectiva sobre la roca competente. Resulta fundamental destacar que, incluso en el escenario de máxima eficiencia y mayor tamaño característico (44,959 mm), el producto combinado del circuito cumple con amplia holgura el límite operativo máximo de 50,8 mm requerido por la planta concentradora para la alimentación de la molienda SAG. Esto

confirma de manera cuantitativa y fenomenológica que la estrategia de optimización por preclasificación incrementa drásticamente la capacidad productiva de la faena sin penalizar ni degradar la calidad del material entregado a las etapas subsecuentes de conminución.

4.15.4 Límites de Capacidad y Cuello de botella

La conclusión más relevante desde el punto de vista productivo se obtiene en la prueba de estrés (Escenario 4). La planta base de 1.000 tph presentaba un cuello de botella inminente en la etapa secundaria (bordeando el 87% de su capacidad instalada). Gracias a la preclasificación y al ajuste de CSS realizado, el circuito demostró ser capaz de procesar 1.150 tph de manera armónica, manteniendo ambos equipos dentro de los rangos aceptables de su capacidad instalada (79,7 % para el primario y 89,4 % para el secundario). Esto representa y demuestra matemáticamente un incremento directo, seguro y factible del 15% de la capacidad de producción total del circuito.

5. Conclusiones

De acuerdo con los objetivos planteados y los resultados obtenidos mediante la simulación en JKSimMet, se concluye lo siguiente:

Impacto positivo del precibado: Se validó la hipótesis de trabajo, demostrando que la incorporación de un sistema de preclasificación (filtro de finos) previo a la etapa de chancado primario permite optimizar significativamente la productividad del circuito. La simulación confirmó que es posible separar eficientemente la fracción fina que no requiere trituración, desviando un 34,5% de la alimentación nominal, eliminando el fenómeno de packing y permitiendo que las fuerzas de compresión se enfoquen exclusivamente en la roca a fracturar, optimizando la energía requerida para la fractura. Cabe destacar que el simulador JKSimMet asume erróneamente un estado de caída libre nula en fricción para este material fino sub-tamaño; por ende, en la realidad operativa, la eliminación de este empaquetamiento (*packing*) protege a los equipos de un desgaste termo-mecánico significativamente mayor al reportado matemáticamente por el software.

Utilización de equipos y optimización de parámetros: La transición del escenario 2 al escenario 3 demostró que la eficiencia de la preclasificación no depende únicamente de la remoción de los finos de la alimentación del chancador primario, sino que también del balance cinemático entre las etapas de chancado primario y secundario. Al ajustar el CSS de 8 a 7 pulgadas se logró un reparto de trabajo armónico donde el chancador primario asume un 75,8% de su capacidad

instalada y el chancador secundario un 81,6 % de la suya. Lo que nos permite aumentar la productividad global del circuito sin sobrepasar los rangos de operación seguros de los equipos. Sin embargo, el análisis de sensibilidad geometalúrgica establece la restricción operativa del sistema: al procesar este flujo máximo de 1.150 tph frente a mineral de alta competencia ($A_{xb} = 30$), el chancador secundario alcanza los 505,10 kW (101% de utilización). Esto define la necesidad de un control dinámico que reduzca la alimentación hacia las 1.000 tph nominales ante frentes de extracción de extrema dureza.

Incremento en la capacidad productiva: La prueba de estrés (Escenario 4) confirmó que el circuito optimizado es capaz de tratar 1.150 tph de manera estable. Esto representa un incremento de un 15% en la productividad global del circuito respecto al caso base, operando dentro de los límites de seguridad electromecánica dictados por los estándares industriales de Metso.

Eficiencia energética y huella de carbono: Como beneficio secundario al incremento de capacidad, el proyecto demostró mejoras en la eficiencia energética del circuito. Al comparar el consumo específico entre el escenario base y la prueba de estrés a máxima capacidad, se obtiene una reducción de 0,605 kWh/t a 0,562 kWh/t, equivalente a una mejora del 7% en la eficiencia del circuito. Aplicando este delta de 0,043 kWh/t al volumen anual procesado de 8.562.900 t/año, el ahorro energético total asciende a 368,2 MWh anuales. Utilizando el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional de Chile de 0,25 tCO₂eq/MWh (Ministerio de Energía, Energía Abierta, 2025), esta mejora equivale a evitar la emisión de 92,1 toneladas de CO₂ equivalente al año, un beneficio ambiental concreto y cuantificable. Asimismo, se garantizó la estabilidad del tamaño característico del producto final (P_{80}) en 44,7 mm en todos los escenarios optimizados, valor que cumple holgadamente el requerimiento de la etapa de molienda SAG aguas abajo (P_{80} máximo de 50,8 mm), confirmando que el incremento productivo no penaliza la calidad del material entregado a las etapas siguientes del proceso.

Rentabilidad económica: Desde la perspectiva financiera, el proyecto representa indicadores excepcionales para una inversión a una planta ya instalada. Con un CAPEX de 1.575.000 USD, la optimización genera un margen bruto adicional de 55.040.258 USD anuales, producto del incremento de 150 tph en la capacidad de tratamiento valorizado en base a la producción adicional de cobre fino. Confirmando que la incorporación de una etapa de preclasificación constituye una estrategia de optimización efectiva disponible para maximizar la utilización de los activos instalados. A este margen de producción se suma una reducción directa en el OPEX del circuito estimada en más de 100.000 USD anuales. Este ahorro se fundamenta en la disminución

de la tasa de desgaste parasitario por abrasión de tres cuerpos, extendiendo la vida útil de los revestimientos de acero al manganeso en la etapa primaria.

En virtud de los antecedentes expuestos, se recomienda la implementación del sistema de preclasificación, cuya estrategia operativa concreta debe definirse en función del objetivo estratégico prioritario de la empresa:

Si el objetivo principal es reducir el desgaste de componentes y los costos de mantención, se recomienda implementar el Grizzly Feeder manteniendo la tasa de alimentación en 1.000 TPH nominales. Bajo esta configuración, la preclasificación elimina el efecto packing en la cámara del chancador primario, extiende la vida útil de los revestimientos de acero al manganeso en un rango estimado de 40% a 60% (Nesans, 2025), reduce el consumo específico de energía de 0,605 a 0,598 kWh/t, y mejora la estabilidad operacional del circuito reduciendo la frecuencia de detenciones no programadas.

Si el objetivo principal es aumentar la capacidad de tratamiento de la planta, se recomienda implementar el Grizzly Feeder y habilitar la operación a 1.150 TPH según la configuración del Escenario 4, lo que representa un incremento productivo del 15% respecto al caso base. Esta es la alternativa de mayor impacto financiero, con un beneficio marginal neto proyectado de 55.040.258 USD anuales y un período de retorno de la inversión de aproximadamente 10 días de operación. Condición previa indispensable: antes de escalar la alimentación a 1.150 TPH, se deberá ejecutar una ingeniería básica que verifique que las etapas aguas abajo, en particular los molinos SAG y de bolas, el sistema de clasificación hidrociclónica y los equipos de flotación, disponen de la capacidad instalada para absorber el incremento de 150 TPH sin degradar la recuperación metalúrgica ni saturar los equipos receptores. Esta verificación escapa al alcance del presente estudio y constituye el siguiente paso necesario en el desarrollo del proyecto.

En ambas alternativas, se recomienda implementar un plan de mantenimiento preventivo estricto para el equipo clasificador. El análisis de sensibilidad de eficiencia (Sección 4.10) demostró que una caída de la eficiencia de precibado al 60% reintroduce carga crítica al sistema, anulando las holguras mecánicas ganadas y llevando al chancador secundario hacia su zona de riesgo operativo. La supervisión periódica del estado de las barras del Grizzly y la gestión de la humedad del mineral ROM son, por lo tanto, condiciones operacionales habilitadoras para sostener los beneficios documentados en este estudio.

6. Referencias

- Abbott, J., et al. (2022). Review and Upgrade of the Throughput Forecast Model of Minera Los Pelambres. En Proceedings of the International Seminar on Process Integration and Geometallurgy (Procemin-Geomet 2022). Santiago, Chile.
- Acoem. (2025). *Jaw Crusher Maintenance in the Metal Industry: Reliability and Condition Monitoring*. Acoem Reliability Solutions. <https://www.acoem.com/en/blog/jaw-crusher-maintenance-metal-industry/>
- Altair Engineering. (2022). The Multibody Dynamics Coupling Interface: EDEM 2022.2 documentation. Altair Engineering Inc. https://2022.help.altair.com/2022.2/EDEM/Multibody_Dynamics_Coupling_Interface.htm
- André, F. P., & Tavares, L. M. (2020). Simulating a laboratory-scale cone crusher in DEM using polyhedral particles. *Powder Technology*, 372, 362–371. [Simulating a laboratory-scale cone crusher in DEM using polyhedral particles - ScienceDirect](#)
- Antofagasta plc. (2026, 29 de enero). Q4 2025 Production Report. https://www.antofagasta.co.uk/media/4885/20260129_aplc25q4prodreport-jan26-vf.pdf
- Barrios, G. K., Jiménez-Herrera, N., Fuentes-Torres, S. N., & Tavares, L. M. (2020). DEM simulation of laboratory-scale jaw crushing of a gold-bearing ore using a particle replacement model. *Minerals*, 10(8), 717. [DEM Simulation of Laboratory-Scale Jaw Crushing of a Gold-Bearing Ore Using a Particle Replacement Model](#)
- Cleary, P. W., Sinnott, M. D., Morrison, R. D., Cummins, S., & Delaney, G. W. (2017). Analysis of cone crusher performance with changes in material properties and operating conditions using DEM. *Minerals Engineering*, 100, 49–70. [Analysis of cone crusher performance with changes in material properties and operating conditions using DEM - ScienceDirect](#)
- Cleary, P. W., & Sinnott, M. D. (2015). Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 1 – Compression crushers. *Minerals Engineering*, 74, 178–197. [Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 1 – Compression crushers - ScienceDirect](#)
- Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2025). Observatorio de Costos Cochilco: Reporte al primer semestre 2025 vs 2024. Dirección de Estudios y Políticas Públicas.
- Consejo Minero. (2026). Cifras actualizadas de la minería: Febrero 2026. [Cifras actualizadas de la minería – Consejo Minero](#)

CostMine. (2024). *Mining Cost Service: Equipment and Operating Cost Data for Mining and Milling*. Edición anual. CostMine Intelligence (IntelligenceMine). Spokane, WA.

Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). *A discrete numerical model for granular assemblies*. *Géotechnique*, 29(1), 47–65. [\(99+\) A discrete numerical model for granular assemblies](#)

DEM Solutions Ltd. (2013). *DEM Solutions extends simulation capability with Multibody Dynamics coupling interface*. Cambridge Network. <https://www.cambridgenetwork.co.uk/news/dem-solutions-extends-simulation-capability-multibody-dynamics-coupling-interface>

Dirección de Presupuestos. (2025). Informe de Finanzas Públicas: Tercer Trimestre 2025. Ministerio de Hacienda, Gobierno de Chile. https://www.dipres.gob.cl/598/articles-386772_doc_pdf.pdf

Fladvad, M., & Onnela, T. (2020). Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. *Minerals Engineering*, 151, 106338 [Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates - ScienceDirect](#)

JKTech. (2020). *JKSimMet Software Brochure*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland. [https://jktech.com.au/files/960/JKTech%20Brochure%20-%20JKSimMet%20Software%20\(July2020\)%20FINAL.pdf](https://jktech.com.au/files/960/JKTech%20Brochure%20-%20JKSimMet%20Software%20(July2020)%20FINAL.pdf)

J. Sepulveda y L. Gutierrez, Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras Mediante Técnicas de Modelación Matemática, 1986.

King, R. P. (2012). *Modeling and simulation of mineral processing systems* (2nd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Korman, T., Bedekovic, G., Kujundzic, T., & Kuhinek, D. (2015). Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 51(2), 461–475. [\(PDF\) Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of Jaw Crusher](#)

Köken, E., & Lawal, A. I. (2021). Investigating the effects of feeding properties on rock breakage by jaw crusher using response surface method and gene expression programming. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 140, 104674. [Investigating the effects of feeding properties on rock breakage by jaw crusher using response surface method and gene expression programming - ScienceDirect](#)

- Li, H., Evertsson, C. M., Lindqvist, M., & Asbjörnsson, G. (2024). Dynamic Modeling and Simulation of SAG Mill Circuits with Pebble Crushing Based on Population Balance Equations. *Minerals*. <https://www.mdpi.com/2075-163X/14/7/716>
- Metso. (2019). Q&A: Bruno simulation software for optimizing aggregate production processes. Metso Outotec. <https://www.metso.com/insights/blog/aggregates/bruno-simulation-software-explained/>
- Metso. (2020). *Crushing and screening handbook* (7th ed.). Metso Outotec. [metso-crushing-and-screening-handbook-edition7-en-web.pdf](https://www.metso.com/insights/blog/aggregates/bruno-simulation-software-explained/)
- Metso (2023). Catálogo técnico de harneros y alimentadores grizzly VF Series. Metso Corporation. [VF Series grizzly feeders - Metso](https://www.metso.com/insights/blog/aggregates/bruno-simulation-software-explained/)
- Michaud, D. (s.f.). *Rock Crushing Rule of Thumb*. 911Metallurgist. [Rock Crushing Rule of Thumb - 911Metallurgist](https://www.911metallurgist.com/2015/02/01/rock-crushing-rule-of-thumb/)
- Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. (2025). Factores de Emisión de la Matriz Eléctrica: Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Plataforma Energía Abierta. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>
- Morrell, S., Napier-Munn, T. J., & Andersen, J. (1992). *The prediction of power draw in comminution machines*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC).
- Napier-Munn, T. (1996). *Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC).
- Nesans India. (2025). *Scalping screen efficiency: Why pre-screening saves you in crusher operating costs*. Nesans Engineering. <https://www.nesansindia.in/blog/scalping-screen-efficiency-why-pre-screening-saves-you-rs-8-ton-in-crusher-operating-costs/>
- Numbi, B. P., Zhang, J., & Xia, X. (2014). *Optimal energy management for a jaw crushing process in deep mines*. University of Pretoria / University of Strathclyde.
- Nunes Filho, E. S. (2018). *Influência da umidade no dimensionamento e seleção de peneiras vibratórias em instalações de britagem* (Tesis de maestría). Universidade de São Paulo. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-09042018-135536/publico/EdisSiqueiraNunesFilhoOrig17.pdf>
- Otava, A. (2020, 7 abril). Selecting crushing chambers for cone crusher. Metso. <https://www.metso.com/insights/blog/aggregates/selecting-cone-crusher-chamber/>

Ramli, S., Fellouh, N., Batouch, T., & Metiri, F. (2019). Optimization of rock primary crusher yield with the use of scalper. *International Journal of Advanced Engineering and Management* <https://www.researchgate.net/publication/333320364>

Rodriguez, L., Morales, M., Valery, W., Valle, R., Hayashida, R., Bonfils, B., & Plasencia, C. (2023). Developing an Advanced Throughput Forecast Model for Minera Los Pelambres. SAG Conference 2023. Vancouver, Canadá

Rodriguez, V. A., Barrios, G. K., & Tavares, L. M. (2022). Coupled DEM-MBD-PRM simulations of high-pressure grinding rolls. Part 1: Calibration and validation in pilot-scale. *Minerals Engineering*, 177, 107389. [Coupled DEM-MBD-PRM simulations of high-pressure grinding rolls. Part 1: Calibration and validation in pilot-scale - ScienceDirect](#)

Sandvik. (2019). *SG & SG-H Grizzly screens: Technical specification*. Sandvik Mining and Rock Technology. <https://www.mining.sandvik/globalassets/products/stationary-crushers-and-screens/pdf/sq-sg-h-grizzly-screens-technical-specification.pdf>

Sandvik Mining and Rock Technology. (2019). *Jaw crusher series: Technical specification*. Sandvik. <https://www.mining.sandvik/globalassets/products/stationary-crushers-and-screens/pdf/jaw-crusher-series-technical-specification.pdf>

Tavares, L. M., André, F. P., Neto, R. O., & Rodrigues, A. L. (2021). An effective sphere-based model for breakage simulation in DEM. *Powder Technology*, 392, 473–488. [An effective sphere-based model for breakage simulation in DEM - ScienceDirect](#)

Universidad de Antioquia. (2019). *Informe final: Formulación de proyecto línea de cribado y trituración*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/61829a32-56d5-47d2-939b-26d8b3288fe9/content>

Universidad Politécnica de Cartagena. (2019). *Clasificación directa: Cribado (Tema 6)*. https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/14072/mod_resource/content/2/Clasificaci%C3%B3n%20directa.%20Cribado2.pdf

Vizcarra, T. (2023). *SAG Mill Design and Benchmarking Using Trends in the JKTech Database*. JKTech. <https://jktech.com.au/news/2023/12/technical-paper-sag-mill-design-and-benchmarking-using-trends-jktech-database>

Wain, Y. A. (2014). Updating the Lang Factor and Testing its Accuracy, Reliability and Precision as a Stochastic Cost Estimating Method. PM World Journal

Weir Minerals. (2023). Four tips for optimising jaw crusher performance. <https://www.global.weir/newsroom/global-news/four-tips-for-optimising-jaw-crusher-performance/>

Wills, B. A., & Finch, J. A. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8va ed.). Butterworth-Heinemann. (Capítulo 6: Crushers, sección de desgaste y mantención)

Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2006). *Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (7th ed.). Elsevier.

Zoneding Machine. (2025). *Secrets to Jaw Crusher Maintenance: Save Costs, Boost Output*. Zoneding Machine Technical Guides. <https://www.zoneding.com/secrets-to-jaw-crusher-maintenance-save-costs-boost-output.html>

7. Anexos

7.1. Anexo 1: Cálculo de Energía Específica

A partir de la ecuación de material fino producido despejamos la energía específica y la calcularemos para los t_{10} que nos solicita el software, que son 10, 20 y 30 para poder completar la matriz de dureza que tiene el software JKSimMet con los Valores de A y b que se mencionan en Estandarización de Parámetros Operativos donde se definen como: $(A \times b) = 36$ con $A = 58$ y $b = 0,62$.

Tabla 7.1 "Valores por defecto para matriz de energía"

t10	(14.5mm)	(20.63mm)	(28.89mm)	particle size mm
t10=10	0,350	0,300	0,250	[kWh/t],Ecs
t10=20	0,800	0,700	0,500	
t10=30	1,200	1,000	0,800	

Despejamos los E_{cs} para los valores de t_{10} que se necesitan para la matriz:

$$t_{10} = A \cdot (1 - e^{-b \cdot E_{cs}})$$

$$E_{cs} = -\frac{1}{b} \cdot \ln\left(1 - \frac{t_{10}}{A}\right)$$

Obteniendo lo siguiente:

$$t_{10} = 10 ; E_{cs} \approx 0,305$$

$$t_{10} = 20 ; E_{cs} \approx 0,682$$

$$t_{10} = 30 ; E_{cs} \approx 1,175$$

Estos valores los tomaremos como el parámetro central de la matriz y lo multiplicaremos por un factor de 1,35 para las partículas de menor tamaño y de 0,9 a las de mayor tamaño. Esta corrección se fundamenta en la fenomenología de fractura (Teoría de Griffith), asumiendo que las partículas más finas presentan una resistencia a la trituración proporcionalmente mayor al poseer una menor densidad de microgrietas internas. Esta calibración es fundamental para evitar que el simulador sobreestime irrealmente la demanda de potencia (kW) de los equipos.

Así obtenemos la matriz que ingresaremos al software para representar los parámetros de dureza del mineral tratado.

Tabla 7.2 " Matriz de t10 vs Ecs"

t10	(14.5mm)	(20.63mm)	(28.89mm)	particle size mm
t10=10	0,412	0,305	0,275	[kWh/t],Ecs
t10=20	0,921	0,682	0,614	
t10=30	1,586	1,175	1,057	

Para dar cumplimiento al análisis de sensibilidad litológica y evaluar la resiliencia del circuito, se replicó la metodología matemática anterior para los escenarios de estrés geomecánico exigidos: un dominio de alta competencia ($A \times b = 30$) y un dominio de mineral de baja competencia ($A \times b = 45$). Para mantener la coherencia geológica representativa de un pórfido cuprífero, se estableció como criterio mantener constante el parámetro asintótico de fractura máxima ($A = 58$), despejando matemáticamente el parámetro de resistencia específica (b) para cada condición.

$$A \times b = A \times b \rightarrow b = \frac{A \times b}{A}$$

Se obtienen los valores de b para los escenarios de alta y baja competencia:

Tabla 7.3 "A x b vs Competencia mineral"

Escenario	A x b	A	B
Mineral de alta competencia	30	58	0,517
Caso base	36	58	0,620
Mineral de baja competencia	45	58	0,776

La elección de mantener $A = 58$ constante se fundamenta en que este parámetro representa la asíntota de la curva de fractura, es decir, el porcentaje máximo teórico de material fino que puede generarse bajo impacto de alta energía, el cual es una propiedad intrínseca de la litología y no varía significativamente dentro de un mismo tipo de roca. El parámetro b , en cambio, controla la pendiente inicial de la curva $t10$ – Ecs y es el que efectivamente refleja la resistencia del mineral a la fragmentación bajo energías de trabajo típicas de chancado. Este criterio es consistente con la práctica del JKMRC para comparaciones geomecánicas dentro de un mismo dominio litológico (Napier-Munn et al., 1996).

Aplicando la misma metodología que se aplicó en el caso base para obtener la matriz de t_{10} vs E_{cs} , Despejamos los E_{cs} para los valores de t_{10} que se necesitan para la matriz:

$$t_{10} = A \cdot (1 - e^{-b \cdot E_{cs}})$$

$$E_{cs} = -\frac{1}{b} \cdot \ln\left(1 - \frac{t_{10}}{A}\right)$$

Obteniendo lo siguiente:

Para mineral de alta competencia ($A \times b = 30$):

$$t_{10} = 10 ; E_{cs} \approx 0,366$$

$$t_{10} = 20 ; E_{cs} \approx 0,818$$

$$t_{10} = 30 ; E_{cs} \approx 1,409$$

Aplicando los factores de corrección por tamaño de partícula definidos en la sección anterior ($\times 1,35$ para 14,5 mm, $\times 1,00$ para 20,63 mm y $\times 0,70$ para 28,89 mm), se obtiene la siguiente matriz de energía para el dominio de alta competencia:

t_{10}	(14.5mm)	(20.63mm)	(28.89mm)	particle size mm
$t_{10}=10$	0,494	0,366	0,329	[kWh/t], E_{cs}
$t_{10}=20$	1,104	0,818	0,736	
$t_{10}=30$	1,902	1,409	1,268	

Los valores superiores de E_{cs} respecto al caso base reflejan el mayor requerimiento energético por unidad de fragmentación para un mineral más competente, lo que se traduce directamente en una mayor demanda de potencia en el simulador y representa la condición de diseño conservadora del circuito.

Para mineral de baja competencia ($A \times b = 45$):

$$t_{10} = 10 ; E_{cs} \approx 0,244$$

$$t_{10} = 20 ; E_{cs} \approx 0,545$$

$$t_{10} = 30 ; E_{cs} \approx 0,939$$

t_{10}	(14.5mm)	(20.63mm)	(28.89mm)	particle size mm
$t_{10}=10$	0,329	0,244	0,219	[kWh/t], E_{cs}
$t_{10}=20$	0,736	0,545	0,490	
$t_{10}=30$	1,268	0,939	0,845	

Los menores valores de Ecs en este dominio son coherentes con la mayor sensibilidad del mineral blando a la fragmentación bajo baja energía específica, lo que el simulador traduce en una menor demanda de potencia y un mayor rendimiento granulométrico para la misma configuración del equipo.

Validación del rango de parámetros

Los valores de Axb empleados en el análisis de sensibilidad (30, 36 y 45) son consistentes con los rangos reportados en la base de datos del JKMRC para yacimientos tipo pórfido cuprífero chileno. A modo de referencia, Rodríguez et al. (2023) reportan para los dominios geomecánicos de Minera Los Pelambres valores de Axb que oscilan entre 28,8 (dominio M7, de alta competencia) y 48,7 (dominio M2, de baja competencia), abarcando completamente el rango evaluado en el presente análisis de sensibilidad. Esto confirma que los escenarios propuestos representan condiciones litológicas reales dentro del tipo de yacimiento estudiado y no constituyen escenarios hipotéticos extremos.

Dado que los parámetros de fractura del mineral del caso de estudio fueron adoptados de bibliografía técnica ante la ausencia de ensayos Drop Weight Test específicos, el análisis de sensibilidad sobre Axb cumple una función metodológica adicional: demuestra que las conclusiones del estudio son robustas frente a la incertidumbre en la caracterización del mineral, constituyendo así una validación indirecta de los resultados de simulación.

M Unit	DWi (kWh/m ³)	Number of SMC Tests	Specific Gravity (t/m ³)	Axb (Calculated from Average DWi)
M1	5.66	1,132	2.55	45.0
M2	5.16	91	2.52	48.7
M3	7.73	119	2.62	33.8
M4	7.81	712	2.64	33.8
M7	8.97	27	2.58	28.8
M8	8.42	183	2.63	31.2

Figura 7.1 " Resumen de la base de datos de ensayos geometalúrgicos por unidades M"

