

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Análisis de la productividad del proceso de chancado en función
del tamaño de alimentación en minerales sulfurados**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Metalúrgico

Elaborado por

Lincoln Pedro Cerda Robles

 [0009-0007-4859-0483](https://orcid.org/0009-0007-4859-0483)

Asesor

MSc. Arturo Leoncio Lobato Flores

 [0000-0002-3890-9338](https://orcid.org/0000-0002-3890-9338)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Cerda Robles [1]
Referencia/Reference	[1] L. Cerda Robles, “Análisis de la productividad del proceso de chancado en función del tamaño de alimentación en minerales sulfurados” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Cerda , 2025)
Referencia/Reference	Cerda , L. (2025). <i>Análisis de la productividad del proceso de chancado en función del tamaño de alimentación en minerales sulfurados</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mi madre , Reyna Robles Medrano. A mi padre, Pedro Cerda Prado y a mis hermanos quienes fueron los motores para poder seguir adelante en toda mi carrera universitaria así como también ahora de manera profesional.

Agradecimientos

A Dios por guiarme por el buen camino.

A mis padres por la dedicación hacia mi persona para seguir triunfando.

A los catedráticos quienes me brindaron sus conocimientos, así como lo hacen hasta ya habiendo terminado la universidad.

Resumen

El chancado constituye una etapa estratégica en el procesamiento de minerales sulfurados, al incidir directamente en la eficiencia energética, la capacidad de tratamiento y la calidad metalúrgica. En este estudio se evaluó la influencia de la granulometría de alimentación sobre el desempeño del circuito de chancado, considerando sus efectos en el consumo energético, la productividad y los costos operativos.

Las pruebas realizadas en un circuito con chancadora de quijadas de 4.5" y cónica de 2" evidenciaron que mantener un F80 \approx 1.49 mm y un P80 \approx 34 μ m optimiza la reducción de tamaño, disminuye la generación de finos y mejora la estabilidad del proceso. El uso de la ecuación de Gates-Gaudin-Schumann permitió modelar el comportamiento del mineral y proyectar con precisión el consumo energético.

La implementación de estrategias como el pre-cribado y el ajuste del CSS redujo el consumo específico de molienda de 0.90 a 0.75 kWh/t, lo que representa un ahorro energético anual de 99,000 kWh, equivalente a \approx 14,850 USD. Adicionalmente, la disminución del desgaste de bolas y revestimientos generó ahorros entre 26,000–37,000 USD/año, mientras que el aumento en la capacidad de procesamiento (2–3 %) significó ingresos adicionales del orden de 660,000–990,000 USD/año.

En conjunto, estos resultados demuestran que el control de la granulometría de alimentación no solo incrementa la eficiencia operativa, sino que constituye una estrategia económicamente atractiva para reducir costos, aumentar ingresos y fortalecer la sostenibilidad de las operaciones polimetálicas.

Palabras clave — Chancado, granulometría, eficiencia energética, costos operativos, sostenibilidad minera.

Abstract

Comminution through crushing represents a critical stage in the processing of sulfide ores, given its direct influence on energy efficiency, plant throughput, and overall metallurgical performance. This research aimed to evaluate the effect of feed particle size distribution on crushing productivity, with emphasis on its impact on specific energy consumption, processing capacity, and final concentrate quality.

Experimental tests were conducted in a crushing circuit consisting of a 4.5" jaw crusher and a 2" cone crusher. Results demonstrated that maintaining an F80 of approximately 1.49 mm and a P80 of 34 μm optimized size reduction efficiency, minimized excessive fines generation, and improved circuit stability. The application of the Gates-Gaudin-Schuhmann model enhanced the predictive accuracy of energy consumption and provided a reliable framework for operational optimization.

The integration of strategies such as pre-screening and CSS adjustment reduced the specific energy consumption in grinding from 0.90 to 0.75 kWh/t, yielding an annual energy saving of 99,000 kWh, equivalent to \approx 14,850 USD at an average unit cost of 0.15 USD/kWh. Furthermore, lower wear rates of grinding media and liners contributed to additional savings of 26,000–37,000 USD/year, while a 2–3 % increase in plant throughput generated incremental revenues in the range of 660,000–990,000 USD/year.

Taken together, these findings highlight that optimizing feed granulometry is not only a technical requirement for improving crushing efficiency but also a highly profitable operational strategy. The combined economic impact — through reduced energy consumption, lower maintenance costs, and increased metal recovery — reinforces the role of feed size control as a cornerstone of sustainable and competitive mineral processing operations.

Keywords — Crushing, feed particle size distribution, energy efficiency, operating costs, sustainable mineral processing.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	1
1.2.1 Problema general	3
1.2.2 Problemas específicos	3
1.3 Objetivos del estudio	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Antecedentes de investigación	4
1.4.1 Locales.....	4
1.4.2 Nacionales	6
1.4.3 Internacionales.....	11
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	15
2.1 Introducción del proceso de chancado	15
2.1.1 Definición	15
2.1.2 Importancia del tamaño de alimentación	15
2.1.3 Tipos de chancadoras	15
2.1.4 Propiedades de los minerales sulfurados	22
2.1.5 Factores que afectan la productividad del chancado	24
2.1.6 Modelos y teorías sobre reducción de tamaño	26
2.1.7 Importancia del tamaño de alimentación en el procesamiento de minerales.....	30
2.1.8 Tecnologías y tendencias en chancado.....	31
2.1.9 Influencia del tamaño de alimentación en la productividad del chancado	35

2.1.10 Optimización del chancado en función de la dureza y composición del mineral ..	39
2.1.11 Modelos matemáticos y simulación del proceso de chancado.....	43
2.1.12 Eficiencia energética y reducción del consumo en el chancado	46
2.1.13 Curvas granulométricas y su impacto en la optimización del chancado.....	49
2.2 Marco conceptual	52
2.2.1 Introducción al marco conceptual	52
2.2.2 Definiciones claves.....	52
2.2.3 Factores que impactan la productividad del chancado	53
2.2.4 Relación entre la granulometría y la eficiencia del chancado.....	53
2.2.5 Modelos matemáticos aplicados al chancado.....	53
2.2.6 Impacto del tamaño de alimentación en el costo operacional	54
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	55
3.1 Procedimiento del circuito de chancado	55
3.2 Procedimiento de estimación de datos	56
3.3 Representación matemática del análisis granulométrico	56
3.3 Evaluación del circuito de chancado.....	58
3.3.1 Análisis granulométrico del circuito de chancado	58
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	63
4.1 Rectificación del análisis granulométrico con la función de distribución de Gates-Gaudin-Schumann (G-G-S) en la chancadora de quijada.....	63
4.2 Rectificación del análisis granulométrico con la función de distribución de Gates-Gaudin-Schumann (G-G-S) en la chancadora cónica.....	65
Conclusiones	76
Recomendaciones	78
Referencias bibliográficas	79
Anexos	86

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Distribución granulométrica descarga chancado primario	58
Tabla 2: Distribución granulométrica del alimento chancado secundario	60
Tabla 3: Distribución granulométrica descarga chancado secundario 2"	61
Tabla 4: Distribución granulométrica descarga chancado secundario 2 1/4"	62
Tabla 5: Distribución granulométrica corregida de la descarga chancado primario	64
Tabla 6: Distribución granulométrica corregida del alimento chancado secundario.....	66
Tabla 7: Distribución granulométrica corregida de descarga chancado secundario 2"	68
Tabla 8: Distribución granulométrica corregida de descarga chancado secundario 2 1/4".....	70

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Diagrama de chancadora de bascula.....	16
Figura 2 : Diagrama de chancadora quijada	17
Figura 3 : Diagrama de chancadora giratoria	18
Figura 4 : Diagrama de chancadora de cono	19
Figura 5 : Diagrama de una chancadora de impacto.....	20
Figura 6 : Diagrama de chancadora movil.....	22
Figura 7 : Ley de Kick	27
Figura 8 : Ley de Rittinger.....	27
Figura 9 : Ley de Bond.....	28
Figura 10: Ejemplo de una curva granulométrica por (Vettorelo,2010).....	30
Figura 11: Rodillos de molienda de alta presión Metso HRCTM (METSO,2024).....	34
Figura 12: Tamaño de alimentación.....	36
Figura 13: Esquema de placa dentada fija y placa dentada móvil y trapecio.....	37
Figura 14: Verificación de los sellos de grasa	38
Figura 15: Temperatura de los baleros	39
Figura 16: Dureza de mineral vs desgaste de manto	40
Figura 17: Circuito de chancado	44
Figura 18: Puntos de muestreo sección chancado.....	56
Figura 19: Distribución granulométrica descarga chancado primario	59
Figura 20: Distribución granulométrica del alimento chancado secundario	60
Figura 21: Distribución granulométrica descarga chancado secundario 2”.....	61
Figura 22: Distribución granulométrica descarga chancado secundario 2 1/4”	62
Figura 23: Distribución granulométrica corregida de la descarga chancado primario	65
Figura 24: Distribución granulométrica corregida del alimento chancado secundario	67
Figura 25: Distribución granulométrica corregida de descarga chancado secundario 2” .	69

Figura 26: Distribución granulométrica corregida de descarga chancado secundario
2 1/4" 71

Figura 27: Distribución granulométrica de alimento y descarga de la chancadora cónica . 72

Introducción

El proceso de chancado constituye una de las etapas más relevantes en el tratamiento de minerales, especialmente sulfurados, debido a su influencia directa en la eficiencia operativa y en la rentabilidad de las plantas concentradoras. Esta etapa tiene como propósito principal reducir el tamaño del mineral proveniente de la mina hasta dimensiones adecuadas para su procesamiento posterior, como la molienda y la flotación. En este contexto, la eficiencia del chancado no solo depende del diseño y operación de los equipos, sino también de la naturaleza del mineral y, especialmente, de la granulometría de la alimentación.

Una alimentación no controlada, con variabilidad en el tamaño de las partículas, puede desencadenar una serie de problemas operativos: incremento del consumo energético, sobrecarga de los equipos, desgaste acelerado de componentes críticos y disminución de la capacidad de procesamiento. Estas condiciones afectan negativamente la eficiencia global del circuito, la calidad del producto final y, por ende, la recuperación de los metales de interés económico como el cobre, zinc y plomo, componentes comunes en los minerales sulfurados.

La presente investigación se orienta a evaluar de manera rigurosa cómo la variabilidad del tamaño de alimentación influye en la productividad del proceso de chancado. Para ello, se analizarán indicadores clave como el consumo energético específico, la eficiencia operativa, la generación de finos y la calidad granulométrica del producto. El estudio se fundamenta en la aplicación de modelos matemáticos de conminución y en la validación empírica mediante ensayos realizados en un circuito compuesto por chancadoras de quijada y de cono.

Este trabajo busca no solo contribuir al conocimiento técnico sobre la interacción entre la granulometría de alimentación y el rendimiento del chancado, sino también proponer lineamientos operativos que permitan optimizar este proceso en plantas de procesamiento de minerales sulfurados. De esta manera, se pretende aportar soluciones

viabiles para reducir los costos operativos, aumentar la eficiencia energética y mejorar la sostenibilidad de las operaciones mineras.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

El proceso de chancado constituye una de las etapas fundamentales dentro de la cadena de valor del procesamiento de minerales, especialmente en depósitos sulfurados, donde se requiere una adecuada reducción de tamaño para garantizar una liberación eficiente de las especies metálicas de interés. Esta operación preliminar no solo facilita el tratamiento posterior en molienda y flotación, sino que también incide directamente en los indicadores de desempeño operativo, como el consumo energético, la capacidad de carga y la eficiencia global del circuito. En el caso de minerales sulfurados, caracterizados por su complejidad mineralógica y alta variabilidad granulométrica, el control del tamaño de alimentación resulta determinante para evitar sobrecargas, reducir la generación excesiva de finos y prolongar la vida útil de los equipos. En este marco, la presente investigación se orienta a analizar la relación entre la granulometría de entrada al circuito de chancado y su impacto sobre la productividad, con el propósito de establecer parámetros operacionales óptimos que contribuyan a una operación más eficiente, sostenible y rentable en el contexto de la industria minera moderna.

1.2 Descripción del problema de investigación

La industria minera enfrenta obstáculos persistentes, particularmente en el procesamiento de minerales sulfurados, ya que busca constantemente optimizar sus procesos para aumentar la eficiencia y estos son una fuente primaria de metales económicamente importantes como serían el cobre, zinc y plomo. Dentro del procesamiento de minerales, el chancado, una etapa fundamental en la reducción del tamaño de partícula del mineral hasta un rango óptimo, consume una cantidad significativa de recursos y tiene un impacto directo en la productividad general de la planta para la obtención de buenos resultados. Sin embargo, la granulometría de la alimentación al chancado es un factor crítico que influye en la eficiencia de este proceso, afectando así la recuperación de los metales de interés.

La granulometría del mineral que se introduce en el chancador no es constante, sino que varía considerablemente debido a factores como las condiciones de fragmentación en la mina y las fluctuaciones en el flujo de material; tales variaciones pueden deberse a factores como la heterogeneidad del mineral en la mina, las deficiencias en la operación de voladura y acarreo, o las limitaciones en la clasificación anterior al chancado. Estas irregularidades impactan directamente el desempeño del chancado, generando resultados indeseables, tales como:

- **Deficiencias energéticas:**

El consumo de energía de la chancadora puede verse afectado por la deficiencia energética debido al tamaño de alimentación inadecuado, lo que puede generar mayores costos operativos. El esfuerzo mecánico requerido para procesar las partículas aumenta cuando se emplean tamaños grandes, mientras que tamaños demasiado pequeños pueden dar como resultado la formación de partículas finas que no contribuyen al proceso.

- **Limitaciones en la capacidad de procesamiento:**

El tamaño del equipo de chancado está limitado a un rango de tamaño específico, lo que garantiza una capacidad de procesamiento óptima. La alimentación frecuente más allá de este rango puede provocar retrasos, disminución de la velocidad de procesamiento y problemas operativos imprevistos.

- **Desgaste prematuro de los equipos:**

La variabilidad en el tamaño de la alimentación somete a los equipos de chancado a esfuerzos mecánicos excesivos, lo que provoca un desgaste prematuro de las piezas de desgaste y, en consecuencia, aumenta la frecuencia y el costo de las operaciones de mantenimiento.

- **Impacto en las etapas posteriores:**

La granulometría del producto de chancado ejerce una influencia directa en la eficiencia de las etapas posteriores del proceso metalúrgico. Una distribución de tamaños de partícula no óptima puede disminuir la eficiencia de la molienda.

A pesar de su importancia, existen estudios limitados que investigan exhaustivamente el impacto del tamaño de la alimentación en los indicadores de productividad en la trituración de minerales sulfurados. La brecha de conocimiento es un obstáculo que dificulta la toma de decisiones informadas para optimizar el proceso.

Por lo tanto, es imperativo llevar a cabo una evaluación exhaustiva para determinar la correlación entre el tamaño de la alimentación y la optimización global de la trituración. Este estudio no solo permitirá optimizar el desempeño operativo, sino que también proporcionará una base sólida, reducir costos de operación, y recuperar metales de interés.

Se puede definir el problema, desde esta pregunta:

1.2.1 Problema general

¿Cómo influye el tamaño de la alimentación en la productividad del proceso de chancado de minerales sobre el consumo energético específico, la capacidad de procesamiento y la calidad del concentrado final?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la relación entre la granulometría de la alimentación y la eficiencia energética del proceso de chancado?
- ¿Qué condiciones de alimentación optimizan la capacidad de procesamiento?
- ¿Cómo afecta la granulometría de alimentación a la generación de finos y la calidad del producto final?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Analizar la influencia de la granulometría de la alimentación en la productividad del proceso de chancado de minerales sulfurados, evaluando el consumo energético específico, la capacidad de procesamiento y la calidad del concentrado final.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar la correlación entre la granulometría de la alimentación y el consumo energético específico.

- Identificar las condiciones de alimentación que maximizan la capacidad de procesamiento.
- Evaluar el efecto del tamaño de alimentación sobre la generación de finos y la calidad granulométrica del producto.

1.4 Antecedentes de investigación

1.4.1 Locales

Ticona (2024) “Incremento de la productividad parcial del trabajo evaluando la configuración de aberturas de la superficie de cribado de una zaranda vibratoria de clasificación húmeda instalada en una planta industrial de concentración de minerales.”, Esta investigación mejora el rendimiento de una zaranda vibratoria húmeda que concentra minerales, focalizándose en aumentar la producción de material fino que pasa a través de la malla. Mediante la inclinación de la zaranda, la dimensión de las aperturas de la malla y las metodologías de lavado, se buscó identificar la configuración óptima que maximizara la eficiencia de clasificación. Utilizando simulaciones computacionales, se proyectó un incremento significativo en la producción de material fino, pasando de 50,000 a 60,000 toneladas diarias. Este aumento, según un análisis económico detallado, no sólo mejoraría la eficiencia del proceso, sino que también generaría un retorno de la inversión considerable, lo que demuestra la viabilidad técnica y económica de las mejoras propuestas. Los resultados de esta investigación permitirán seleccionar el material más adecuado para la malla, considerando el desgaste por la abrasividad del mineral, y así garantizar una operación más eficiente y duradera.

Mayta (2023), “La aproximación polinómica aplicada en la corrección de datos de granulometría en un circuito de molienda clasificación de minerales”. Este estudio investigó la precisión de diferentes métodos numéricos para ajustar curvas de distribución granulométrica en un proceso de molienda y clasificación de minerales. Se hicieron evaluaciones comparativas de tres métodos: aproximaciones polinómicas (serie de Taylor), optimización con restricciones (método de Lagrange) y el método de la gradiente reducida (distribución de Weibull). Los resultados obtenidos demostraron que el método de las

aproximaciones polinómicas proporcionó el ajuste más preciso a los datos experimentales, presentando un margen de error significativamente de menor porcentaje respecto a los demás; empleando dicho método, se garantiza de dimensiones de partículas, lo que permite optimizar los procesos de molienda y la eficiencia al recuperar minerales.

Hinojosa (2023), “Diseño de una planta de chancado para reducir el costo de capital (CAPEX) de un proyecto minero en la etapa de factibilidad.”, Se llegó a la conclusión que la ubicación. Un diseño subóptimo puede resultar en el incremento considerable de costos asociados al movimiento de tierra y obras de carácter civil, incrementando así el CAPEX total. Variables como la elección de equipos, la longitud y ruta de recorrido de las bandas transportadoras, así como la pendiente y los radios de curvatura de estas, son factores críticos que deben considerarse cuidadosamente en el diseño para los costos de inversión.

Tocto (2023), “Aplicación de la tecnología HPGR (High Pressure Grinding Rolls) que son los rodillos de molienda de alta presión en el circuito de chancado para aumentar el tonelaje en molienda”. La investigación realizada evidencia que la implementación de la tecnología HPGR en la última fase de un circuito de chancado resulta en un significativo aumento de la productividad en el procesamiento de minerales. Los resultados obtenidos son contundentes: evidencian un incremento del 10.8% en el tonelaje procesado, lo cual se traduce en un mayor rendimiento de la planta. Además, se observó una reducción en el consumo de energía y acero, y una disminución del índice de trabajo, así como una incrementación.

León (2020), “Plan de mantenimiento preventivo para incrementar la productividad de los equipos de chancado secundario en una empresa minera”. Este estudio enfocado sobre la empresa minera Porvenir, tiene como objetivo de incrementar la productividad de los equipos de chancado. Al identificar que las constantes paradas de equipos afectaban significativamente la producción, se implementó un método de mantenimiento de prevención. Los resultados obtenidos fueron contundentes: se logró un aumento del 5.56% en productividad general y un incremento del 2.55% en la eficiencia de las horas máquina, optimizando así los procesos productivos.

Herrera Asto (2019), “Implementación de un plan de mantenimiento preventivo para optimizar el circuito de chancado en la Compañía Minera Chungar-Unidad Alpamarca”, en esta investigación, se demuestra el impacto positivo debido a la ejecución de un plan de prevención que permitió optimizar la gestión de las actividades de mantenimiento. Al establecer un sistema de advertencias, registros y notificaciones para las disposiciones de trabajo, se generó un backlog que permitió programar las intervenciones de manera oportuna y eficiente, de acuerdo con lo establecido en el plan. Como resultado, se logró un incremento en la producción diaria de 2000 a 2625 toneladas métricas, además de un ahorro de 0.281 dólares por tonelada métrica procesada.

Galarza (2022), “Mejora de procesos para incrementar la productividad en una empresa minera”, este estudio al analizar los procesos productivos respectivos, demuestra que no solo las variables de diseño de la planta concentradora, sino también aquellas relacionadas con la operación y las independientes de factores externos, como serían: la implementación de mejoras en la capacitación del personal, el mantenimiento industrial, la seguridad y salud en el trabajo, así como la optimización de los métodos de trabajo. Se tuvo productividad (9.5%), eficiencia (2.39%) y eficacia (6.93%) de los procesos.

1.4.2 Nacionales

Salazar (2019), “Análisis económico del diseño y construcción de muros de suelo reforzado como base de instalación de una chancadora primaria semi – móvil”, detallado de las diferentes alternativas constructivas para la instalación de chancadoras primarias en la industria minera, con el objetivo de identificar soluciones más rentables y eficientes, debido a la variabilidad de precio del mineral, y evaluando la viabilidad económica y técnica de utilizar muros de suelo reforzado en comparación con otras opciones tradicionales, como el concreto armado y las estructuras metálicas. A través de un estudio de caso en la mina Cuajone, se demostró que los muros de suelo reforzado ofrecen una mejor relación costo-beneficio en comparación con las opciones tradicionales de concreto armado y estructuras metálicas. Los resultados obtenidos indican no sólo que esta tecnología presenta un valor presente neto y un costo anual equivalente más favorables, sino que es

más eficiente en términos constructivos y de mantenimiento, optimiza los costos de inversión en proyectos mineros.

Refugio y Rodriguez (2009), "Evaluación del chancado, molienda y flotación para la ampliación de planta de 3 600 a 4 200 tmsd en la unidad minera Yauliyacu - empresa minera los Quenuales S. A.". Este estudio integral en la Unidad Minera Yauliyacu se llevó a cabo con el objetivo de evaluar la factibilidad, determinar la viabilidad técnica y económica, de una expansión de capacidad de procesamiento de mineral, con el fin de optimizar la producción y la rentabilidad de la operación minera de 3600 a 4200 toneladas métricas diarias. Un exhaustivo de la planta concentradora, identificando las limitaciones actuales y las oportunidades de mejora. El estudio se centró en evaluar la capacidad actual de la planta, identificar las modificaciones necesarias en equipos y procesos, y explorar la implementación de nuevas tecnologías, como los Stack Sizers, para optimizar el proceso; e incluyó una proyección detallada de los resultados esperados en términos de producción y costos. Los resultados de este análisis permitieron proyectar los beneficios económicos y operativos de la expansión, considerando factores como el consumo energético y los requerimientos de mantenimiento.

Paucar (2021), "Cinética de flotación de minerales sulfurados para obtención del concentrado de cobre y zinc en planta concentradora de empresa los Quenuales S.A. Unidad minera Contonga – San Marcos 2021". Este estudio, llevado a cabo respecto a la mina, Contonga con el fin de maximizar cobre, plomo y zinc en el proceso de flotación, a partir de un mineral específico. Mediante un conjunto de ensayos experimentales, se evaluó el impacto de diferentes variables operativas. Resultando en que, al ajustar adecuadamente estas variables, especialmente el incremento del lapso de flotación, se logra una recuperación significativamente mayor de los metales de interés (cobre y zinc); por ejemplo, al extender tal tiempo hasta 8 minutos, se alcanzaron recuperaciones de cobre y zinc del 85.11% y 86.24%, respectivamente. Consiguiendo demostrar una base sólida para optimizar la flotación en planta y aumentar rentabilidad de la operación minera.

Castillo (2019), "Instalación de chancadora short head para mejorar el análisis granulométrico del producto del chancado en Sociedad Minera el Brocal S.A.A., Pasco-2019". Se emprendió una solución innovadora para optimizar el proceso de chancado terciario, en una planta que mostraba señales de desgaste y una reducción de eficiencia, debido a que superaba la década operando, radicando el problema en la calidad del producto final, con un tamaño de partícula mayor al deseado y un elevado porcentaje de material que debía ser reprocesado. Al reemplazar la antigua chancadora por un modelo short head moderno y eficiente, para solucionar la problemática, se redujo el tamaño de partícula promedio a 8.33 mm y disminuyendo la cantidad de material que requería reprocesamiento. Esta actualización tecnológica no solo incrementó la capacidad de procesamiento en 19 toneladas métricas por hora, sino que también optimizó los procesos siguientes, como la molienda.

Cristobal y Huatuco (2012), "Determinación del work index según la teoría de e. Bond mediante pruebas de moliendabilidad de sulfuros para el control de la etapa de molienda a nivel de laboratorio en la facultad de ingeniería química – U.N.C.P.". Este estudio exhaustivo sobre la moliabilidad de la calcopirita, un mineral de cobre se realizó con el objetivo de determinar las condiciones óptimas para liberar los granos de mineral y facilitar su posterior procesamiento. Utilizando equipos de laboratorio, se realizaron pruebas de chancado y molienda, variando factores como el tamaño de la alimentación y el tiempo de molienda, en el consumo energético y la eficiencia del proceso. Los resultados obtenidos revelaron que la molienda es la fase de mayor consumo de energía en comparación con el chancado; adicionalmente, se determinó que una granulometría del 76.26% pasando por una malla 100 es la óptima para maximizar la recuperación de cobre a partir de este mineral. Esta investigación proporciona información valiosa una base sólida de para optimizar los circuitos de molienda en la industria minera y reducir los costos de producción, mejorando la eficiencia.

Támara (2021). "Optimización del circuito de chancado en la planta de beneficio el Inka". Este estudio presenta un caso "El Inka", donde se llevó a cabo una transformación

radical, pasando de 480 a 960 toneladas métricas secas por día. A través de una reingeniería completa del proceso, que incluyó la reutilización y ampliación de equipos existentes, así como la incorporación de nuevas tecnologías (bandas transportadoras de mayor capacidad), se logró alcanzar la meta propuesta para aumentar significativamente su producción. Un análisis riguroso de los datos demostró que esta reconfiguración no solo permitió incrementar la producción en un 85%, sino que también mejoró la eficiencia general del proceso. Los resultados obtenidos manifiestan que esta inversión ha sido favorablemente rentable, mejorando significativamente la eficiencia general de la planta y posicionándola como un referente en el sector.

Quinta (2018), "Evaluación del circuito de conminución y flotación de la planta concentradora de la empresa minera MINSUR S.A"., Esta investigación exhaustiva, evalúa integralmente los circuitos metalúrgicos de conminación y flotación de la planta concentradora de Minsur S.A., con el objetivo de maximizar la recuperación de estaño a partir de minerales complejos, y reducir los costos operativos. Mediante la cinética de flotación, se identificaron las principales variables, se propusieron mejoras para optimizar el circuito de flotación. Los resultados obtenidos condescendieron la mejor comprensión de la complejidad del mineral y desarrollar estrategias para mejorar la recuperación de estaño.

Puma (2021), "Evaluación de minerales polimetálicos de wolframita y molibdenita para su adaptación de beneficio metalúrgico", la generación de finos en la conminución de minerales polimetálicos, especialmente en aquellos que contienen wolframita. El autor enfatiza que la optimización de los parámetros de conminución es fundamental para minimizar las pérdidas de mineral valioso y mejorar la eficiencia del proceso metalúrgico, puesto que la producción excesiva de finos puede llevar a pérdidas significativas de mineral valioso durante las etapas posteriores de concentración. Para lograr este objetivo, se propone un enfoque integral que considera la selección de equipos adecuados, el control de la energía específica de molienda.

Br Alcade Ruiz (2019), "Emulsión gasificada en reemplazo de heavy anfo para reducir el P80 en la fragmentación e incrementar la productividad en carguío, acarreo y chancado en mina Shougang Hierro Perú"., este estudio demuestra que la utilización de emulsión gasificada SAN G APU en la mina Shougang Hierro Perú permitió mejorar significativamente la eficiencia de la fragmentación, obteniendo un tamaño de partícula más uniforme y adecuado para los procesos siguientes. La mayor velocidad de detonación de la emulsión, un 8.3% superior al ANFO, impactando directamente con los índices granulométricos teniendo en promedio un P80 a 7.8 pulgadas (dentro de los requerimientos de la alimentación de la chancadora), redujo la fragmentación generada por la emulsión, optimizando el desempeño de los equipos de carga y acarreo, los chancadoras en un 3.2%.

Vásquez (2022), "Optimización del circuito de chancado de la planta de agregados fundo alto del rio, AREQUIPA 2020". este estudio evalúa el impacto de la implementación de una faja transportadora, por la minimización de tiempos de parada para mantenimiento. Los resultados obtenidos demostraron que esta mejora tecnológica permitió el uso de indicadores para poder evaluar los beneficios generados por su implementación, reduciendo significativamente el tiempo de paradas de largos periodos no programadas debido a reparaciones de fallas en un 5.51%. Al optimizar el mantenimiento preventivo, se logró una mayor eficiencia en el proceso de producción y una reducción de los costos asociados a las paradas no planificadas.

León Gonzales (2020), "Aplicación de la mejora continua para incrementar la productividad de la empresa Astilleros-División Minera"., este estudio demostró que la falta de un enfoque sistemático para la mejora continua en la empresa Astilleros-División Minera estaba generando cuellos de botella en la operación de la chancadora de quijada. Al analizar los datos históricos y realizar una evaluación detallada de los procesos, se identificaron los factores que generaban una ineficiente mejora continua: tolerancia excesiva de los operarios; así como las diversas oportunidades de mejora, como: la optimización del mantenimiento preventivo. La implementación de estas mejoras permitió

alcanzar un incremento del 44.7% en la productividad y la eficiencia de un 92.02% y en la eficacia de un 92.8%.

1.4.3 Internacionales

Rodríguez (2015), en su investigación titulada “Optimización y mejora en la etapa de chancado/aglomerado/lixiviación en Minera Anita Ltda.”, planteó como objetivo incrementar la eficiencia en la producción de sulfato de cobre pentahidratado mediante la optimización de las etapas iniciales del proceso metalúrgico, particularmente el chancado y la aglomeración. El estudio identificó que el tamaño excesivamente grueso del mineral y la baja calidad de los glómeros eran los principales factores limitantes para una eficiente recuperación de cobre. Además, se evidenció que el equipo de aglomeración operaba con bajo rendimiento, comprometiendo la calidad de los glómeros y, en consecuencia, la efectividad del proceso de lixiviación.

Para abordar esta problemática, se desarrollaron pruebas a escala de laboratorio que permitieron definir mejoras tecnológicas enfocadas en reducir el tamaño de partícula y optimizar las condiciones de aglomeración. Estas acciones lograron mejorar significativamente la calidad del material tratado y elevar los índices de recuperación de cobre durante la lixiviación. Los análisis técnico-económicos del proyecto demostraron la viabilidad de las mejoras propuestas, evidenciando que la implementación de nuevos equipos de chancado y aglomeración generaría un retorno de inversión menor a tres meses, consolidando así una alternativa tecnológica eficiente y económicamente favorable para la operación.

Bascuñán (2021), “Mapa de procesos de chancado: hallazgos y oportunidades de mejora para estabilizar niveles de stockpile utilizando metodología dmaic en división los bronce angloamerican SUR S.A”., este estudio contempla un análisis exhaustivo del proceso de chancado en la División “Los Bronces de Anglo American”, identificando que las pérdidas significativas de producción alcanzaban un 86% de las pérdidas totales en la etapa de molienda, y estaban estrechamente relacionadas con la gestión del cambio tras la implementación del Centro Integrado de Operación Remota (IROC). Para abordar esta

problemática, se implementó una metodología Seis Sigma con el fin de mapear y optimizar el proceso de chancado; al analizar el flujo de decisiones y las comunicaciones entre las distintas áreas, se detectaron brechas significativas en la comunicación y coordinación, esta brecha generaba inestabilidad en los niveles de stock y afectaba la continuidad operacional. Para solucionar esta problemática, se implementó un plan de acción que incluyó el diseño de talleres de capacitación, para clarificar roles y responsabilidades, estableciendo planes de acción específicos para cada área involucrada, lo que permitió mejorar la estabilidad de los niveles de stockpile y optimizar la producción. De esta manera, se busca mejorar la comunicación y coordinación entre Mina, Planta e IROC, para estandarizar la molienda y optimizar la producción.

Zaror (2018), "Productividad en la gran minería del cobre en Chile: del diagnóstico a los planes de acción", la metodología DAPA para transformar los diagnósticos de productividad en procedimientos de operación determinados y medibles en la gran minería del cobre. Al integrar esta metodología en la planificación estratégica, las empresas pueden identificar las brechas existentes, priorizar las iniciativas de mejora. Además, se destaca la importancia de complementar este enfoque con las recomendaciones de la CNP, especialmente en lo que respecta a la sistematización y la gestión de información actualizada.

Yévenes (2021), "Metodología para la medición y análisis de la productividad en operaciones mineras: productividad total de factores"., esta investigación presenta un enfoque cuantitativo para evaluar la productividad factorial en operaciones mineras, donde se desarrolla un modelo matemático que permite relacionar la productividad con variables clave como la granulometría del mineral y la eficiencia de los procesos, debido a que una correcta granulometría impacta de manera positiva en la eficiencia y productividad de los procesos posteriores. Al analizar el impacto de la granulometría, el estudio destaca la importancia de optimizar este parámetro para mejorar la productividad general de la operación. Además, se sugiere la implementación de tecnologías innovadoras, como el Bulk Ore Sorting, para separar el mineral de acuerdo con su ley de cobre antes del proceso

de chancado, mejorar aún más la eficiencia del proceso y aumentar la recuperación de mineral.

Toledo (2021), "Metodología de análisis de criticidad de activos aplicado en planta de procesos para optimizar la productividad en minera Paicavi", utilizando una combinación de herramientas analíticas basadas en el riesgo y el método Jack Knife. Los resultados obtenidos permitieron identificar que tanto los molinos como los chancadores son equipos críticos para la continuidad operacional de la planta, debido a su alto impacto en la producción. Sin embargo, la frecuencia de fallas de estos equipos es relativamente baja, lo que sugiere que tanto los molinos como los chancadores presentan una criticidad media debido a su alto impacto en la continuidad operacional que se ve reducido debido a la baja frecuencia de fallas, y que existen oportunidades para mejorar su confiabilidad.

Vásquez (2019), "Desarrollo de una estrategia de confiabilidad en planta chancado división Gabriela Mistral"., La investigación demostró que el proceso de chancado es crucial, donde el principal desafío a enfrentar es la disminución de la ley cobre en el mineral, lo que lleva al procesamiento de un mayor volumen de material. Un factor clave para la optimización de los procesos es la confiabilidad de los equipos, especialmente de los chancadores debido a que las fallas en los mismos generan pérdidas significativas de producción y aumenta los costos de mantenimientos. Para abordar dicha problemática se implemente una estrategia de confiabilidad mixta combinando diversas herramientas y técnicas como: OEE, Jack Knife, SOMA, RCM, AMEF, KPIs y Benchmarking.

Song et al (2022), "Study on the distribution pattern of particle re-crushing in the coal and rock mass crushing process under pressure"., este estudio detallado analiza el comportamiento sobre la fragmentación de partículas de carbón y roca y como estas se redistribuyen cuando están sometidas a presión durante el proceso de chancado. A través de una combinación modelos experimentales y simulaciones numéricas, es posible identificar patrones de refracturación de partículas, destacando que las características físicas y la energía aplicada influyen en la distribución y eficiencia de los fragmentos en el proceso chancado. Los resultados obtenidos en este artículo son de gran relevancia para

la optimización eficiente energéticamente del proceso de chancado, ya que permiten comprender mejor los mecanismos físicos que gobiernan la fragmentación de partículas trituradas y seleccionar los parámetros de operación más adecuados.

Los resultados obtenidos en este artículo permiten entender mejor el comportamiento mecánicos de las partículas trituradas, lo cual es crucial para optimizar la eficiencia energética durante el proceso de chancado.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Introducción del proceso de chancado

2.1.1 Definición

El proceso de chancado se lleva a cabo con la finalidad de preparar el mineral bruto de una mena en fracciones valiosas y carentes de valor. Es una etapa del beneficio de minerales, extraído de la mina haciendo uso de los diferentes equipos como serían las chancadoras cónicas, giratorias y de mandíbulas. Este proceso es esencial para obtener un tamaño adecuado que facilite el manejo y procesamiento en etapas posteriores, como la molienda, concentración gravimétrica, flotación, lixiviación, etc. (Valenzuela et al., 2010)

2.1.2 Importancia del tamaño de alimentación

Estos equipos son fundamentales en las etapas de chancado y molienda, cuya finalidad es reducir el tamaño del mineral hasta alcanzar una granulometría adecuada para la liberación y posterior extracción del contenido metálico valioso. Esta operación resulta esencial dentro del proceso metalúrgico, ya que el tamaño óptimo de partícula varía en función del tipo de mineral y del método de concentración a emplear. Una reducción excesiva no solo implica un uso ineficiente de recursos energéticos y operativos, sino que también genera un exceso de partículas finas que puede obstaculizar las etapas siguientes, disminuyendo tanto la eficiencia como el porcentaje de recuperación. Por el contrario, una reducción insuficiente produce partículas de gran tamaño que impiden la adecuada penetración de los reactivos, limitando la liberación de minerales útiles y aumentando la pérdida de valor en los relaves generados.

2.1.3 Tipos de chancadoras

2.1.3.1 Chancadoras de mandíbulas y basculas. Como primera etapa en los procesos de trituración, los chancadores de mandíbula son equipos de reducción de tamaño de primera instancia diseñados para triturar grandes fragmentos de material a dimensiones manejables.

El funcionamiento de los chancadores de mandíbula se basa en un principio simple: la compresión alternativa de material, entre dos superficies. Accionada por un mecanismo excéntrico, ejercen una fuerza de compresión sobre el material, fragmentándolo en partículas más pequeñas.

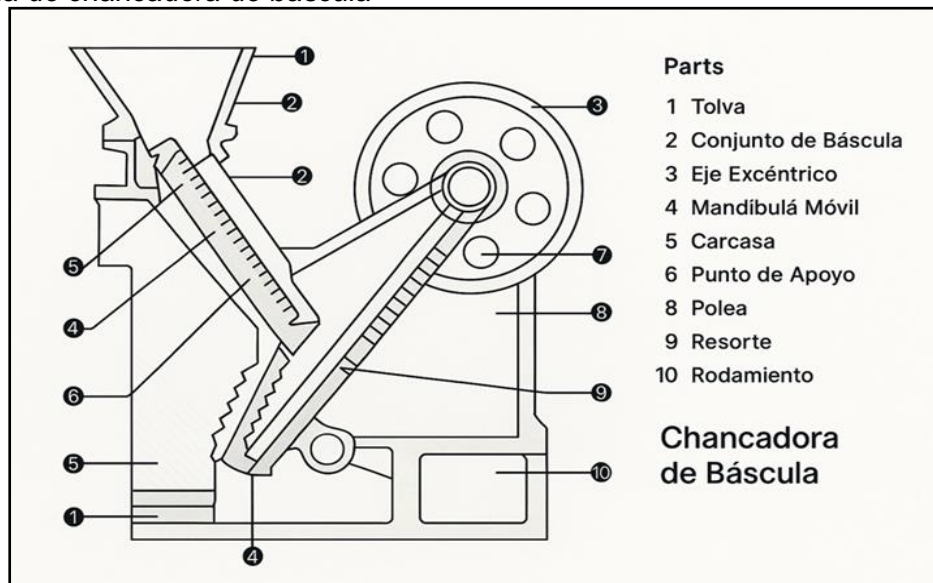
Según la empresa finlandesa multinacional METSO Corporation líder mundial en soluciones tecnológicas sostenibles para los sectores de áridos, procesamiento de minerales y refinado de metales, los chancadores de mandíbula se pueden categorizar en dos grupos principales, diferenciados por el número de placas basculadoras que utilizan para realizar la acción de trituración: una y doble.

En los chancadores, la acción de trituración se produce gracias a la rotación de un eje excéntrico que acciona una placa basculadora, generando una fuerza de compresión efectiva que fragmenta el material.

A diferencia de los modelos de placa basculadora única, los chancadores de mandíbula con doble placa basculadora, incorporan dos ejes excéntricos que trabajan en conjunto para generar una fuerza de compresión más potente y eficiente: el primer eje rota en la parte superior, y el segundo (excéntrico), mueve ambas placas para llevar a cabo el chancado. A continuación, se presentan los dos tipos de chancadoras:

Figura 1

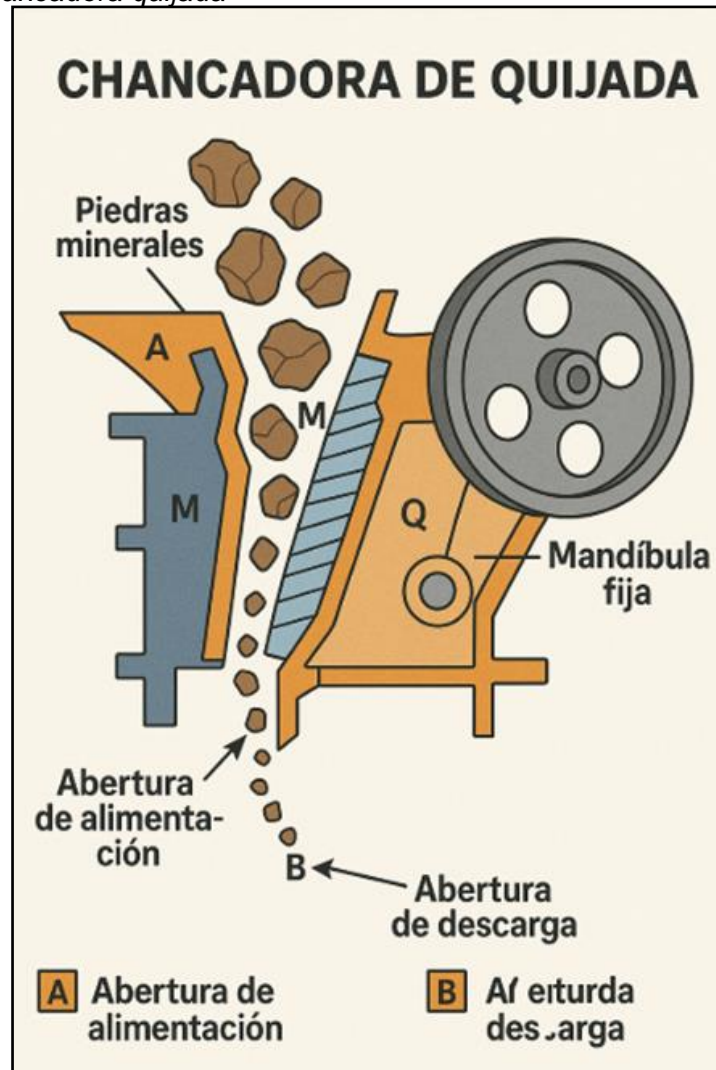
Diagrama de chancadora de bascula



Fuente: Elaboración propia

Figura 2

Diagrama de chancadora quijada

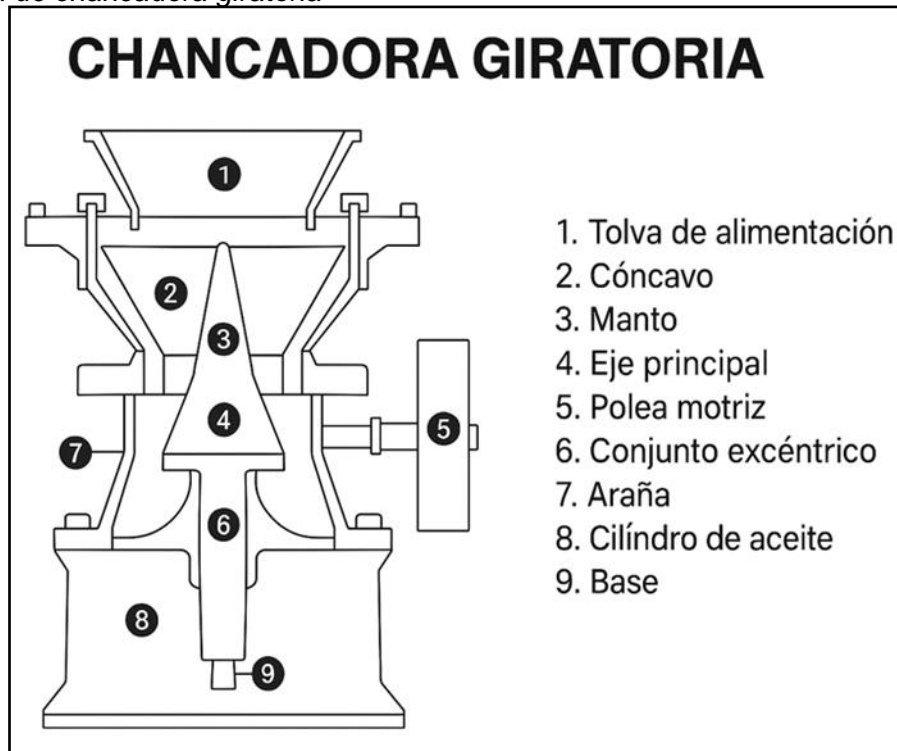


Fuente: Elaboración propia.

2.1.3.2 Chancadoras giratorias. Las chancadoras giratorias se utilizan principalmente en el chancado primario de operaciones mineras a gran escala, debido a su capacidad para procesar grandes volúmenes de material con fragmentos de gran tamaño directamente extraídos de la mina. Su diseño robusto y de operación continua permite una reducción eficiente del mineral a tamaños manejables para las etapas posteriores, como la molienda. Son especialmente útiles cuando se requiere alta capacidad de procesamiento, menor tiempo de inactividad y una operación estable, lo que las convierte en una opción ideal para plantas concentradoras que manejan minerales sulfurados y buscan maximizar la eficiencia y rentabilidad del proceso.

Figura 3

Diagrama de chancadora giratoria



Fuente: Elaboración propia.

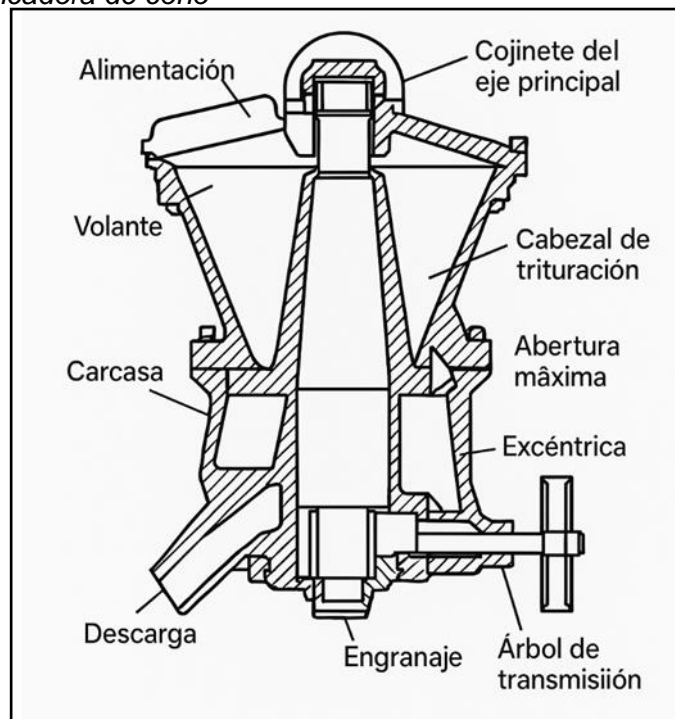
2.1.3.3 Chancadoras de cono. Las chancadoras de cono se utilizan principalmente en las etapas de chancado secundario, terciario o cuaternario, es decir, después del chancado primario, cuando el mineral ya ha sido reducido a tamaños intermedios. Estas máquinas son apropiadas para reducir aún más el tamaño del mineral hasta alcanzar una granulometría adecuada para la molienda. Se emplean cuando se requiere obtener un producto con mayor control granulométrico, ya que permiten ajustar con precisión la apertura de descarga y mantener una curva de distribución estable. Su diseño, que incluye un eje excéntrico que provoca el movimiento oscilante del cabezal cónico dentro de un revestimiento fijo, permite una trituración eficiente por compresión continua, favoreciendo la reducción uniforme del material y una menor generación de finos en comparación con otros tipos de chancadoras.

Estas chancadoras son especialmente útiles en operaciones donde se procesan minerales de dureza media a alta y donde es necesario garantizar una alta capacidad de producción con bajos costos operativos. También son preferidas cuando se busca

prolongar la vida útil de los revestimientos y reducir el desgaste mediante trituración entre partículas. Las chancadoras de cono modernas cuentan con sistemas hidráulicos de ajuste y protección, lo que facilita su operación y mantenimiento. Por ello, se utilizan comúnmente en plantas de concentración de minerales metálicos como cobre, zinc, hierro y oro, donde se requiere una conminución controlada antes del ingreso a los molinos. Además, su versatilidad permite integrarlas tanto en circuitos abiertos como cerrados, optimizando el rendimiento global del proceso de conminución.

Figura 4

Diagrama de chancadora de cono



Fuente: Elaboración propia.

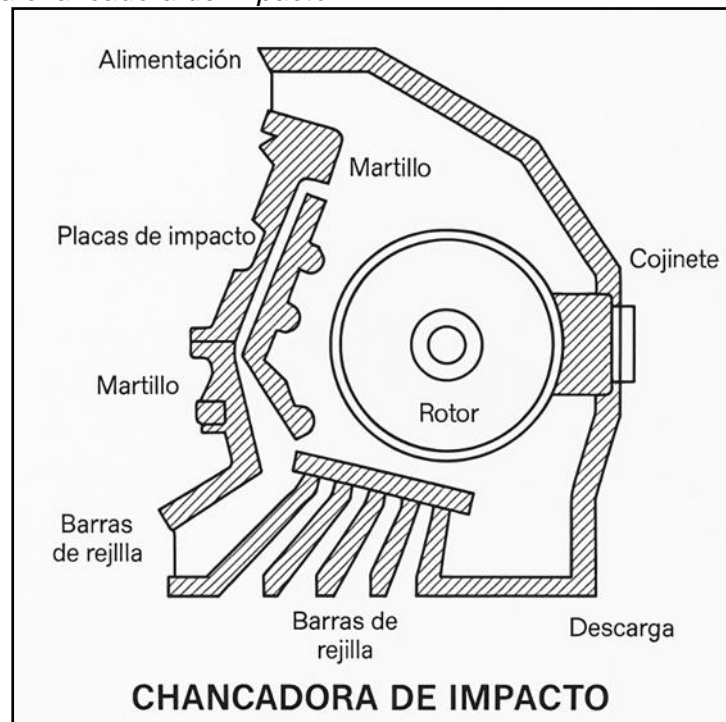
2.1.3.4 Chancadoras de impacto. Las chancadoras de impacto se utilizan principalmente cuando se requiere obtener un producto final con una granulometría fina y bien definida, siendo especialmente útiles en las etapas de chancado secundario y terciario. Estas máquinas operan mediante la proyección del material a alta velocidad contra placas de impacto o contra otras partículas, fragmentándolo por fuerzas de impacto en lugar de compresión. Son recomendadas para procesar materiales de dureza media a baja, tales como calizas, yeso, carbón y minerales con características friables, aunque también pueden emplearse en la trituración de minerales más duros si se diseñan

adecuadamente. Su eficiencia reside en la capacidad de generar productos con buena forma cúbica y bajo contenido de partículas alargadas, lo cual es deseable en industrias como la construcción y producción de agregados para concreto y asfalto.

Además, las chancadoras de impacto se utilizan cuando el proceso exige una alta razón de reducción, es decir, reducir significativamente el tamaño del material en una sola etapa. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde se requiere minimizar el número de equipos de conminución o reducir el consumo energético asociado al retriturado. También son apropiadas en procesos donde el control de los finos es menos restrictivo o donde estos pueden ser aprovechados comercialmente. En contextos industriales modernos, los modelos de impacto incluyen sistemas hidráulicos de ajuste, monitoreo automatizado y configuraciones de eje horizontal (HSI) o vertical (VSI), que permiten adaptarlas a distintos tipos de materiales y condiciones operativas. Por su versatilidad y capacidad de generar productos uniformes, estas chancadoras resultan valiosas tanto en plantas de procesamiento de minerales como en canteras y plantas de agregados.

Figura 5

Diagrama de una chancadora de impacto



Fuente: Elaboración propia.

2.1.3.5 Chancadoras móviles. Las chancadoras móviles se utilizan principalmente en operaciones mineras, de construcción o reciclaje donde se requiere movilidad, flexibilidad operativa y reducción de costos logísticos. Son ideales para ser empleadas directamente en el frente de trabajo o en zonas alejadas de plantas fijas, ya que permiten triturar el material in situ y evitar el transporte de grandes volúmenes de roca hacia estaciones de chancado estacionarias.

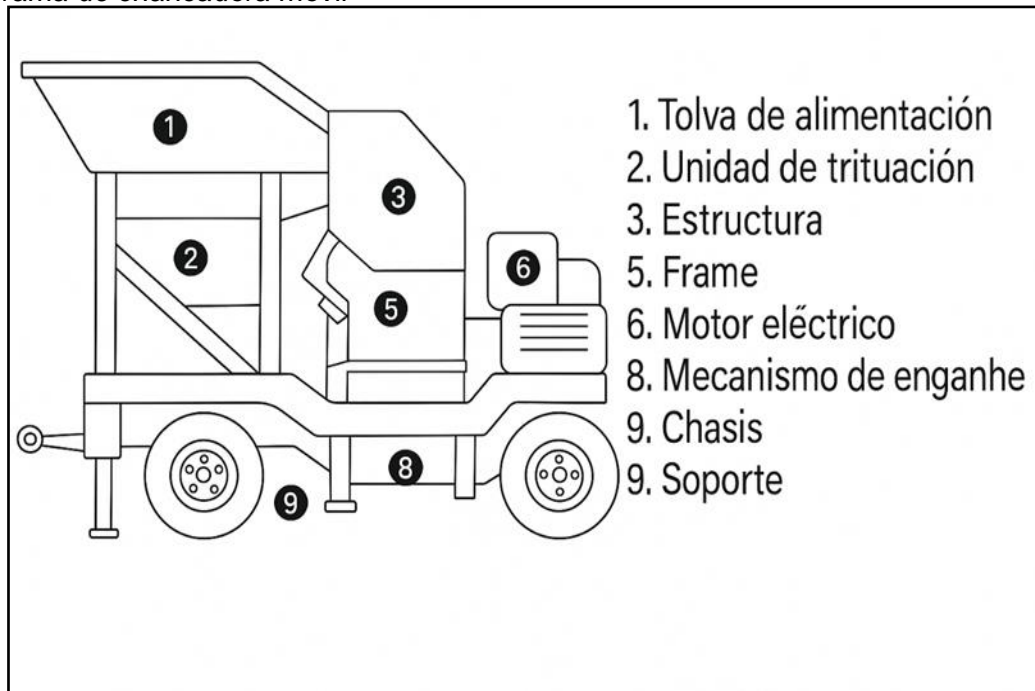
Este tipo de chancadoras está montado sobre orugas o ruedas, lo que facilita su desplazamiento dentro del yacimiento o proyecto, y permite una instalación rápida sin necesidad de obras civiles complejas. Son especialmente útiles en proyectos temporales, en obras viales, canteras, excavaciones urbanas, y en la explotación de tajos abiertos de menor escala o de difícil acceso, donde se requiere una producción inmediata con menores tiempos de montaje y desmontaje.

Además, las chancadoras móviles se emplean cuando se necesita adaptabilidad ante cambios en el diseño de mina, fases del tajo o en proyectos multietapas. Su capacidad para trabajar de manera autónoma o integrada a un circuito de procesamiento móvil (incluyendo zarandas, fajas transportadoras y sistemas de clasificación) las convierte en una solución eficiente para obtener productos granulométricos específicos según la demanda del proyecto. También se utilizan en el reciclaje de materiales de demolición, hormigón, asfalto y residuos de construcción, reduciendo el impacto ambiental y aprovechando materiales reutilizables.

Estas chancadoras permiten además una operación remota y automatizada, con sistemas de control que optimizan el consumo de combustible, reducen emisiones y mejoran la seguridad operativa. En síntesis, se emplean en contextos donde la movilidad, rapidez de operación y adaptabilidad a entornos variables son criterios clave para una operación eficaz y rentable.

Figura 6

Diagrama de chancadora móvil



Fuente: Elaboración propia.

2.1.4 Propiedades de los minerales sulfurados

2.1.4.1 Definición. Son aquellos compuestos químicos que contienen azufre combinado con elementos metálicos. Comúnmente encontrados en depósitos minerales y son de gran importancia económica por contener metales valiosos como cobre, plomo, zinc y níquel en forma de sulfuros.

2.1.4.2 Características. Presentan una amplia variedad en cuanto al modo en que se enlazan sus átomos, pudiendo tener enlaces iónicos, covalentes y metálicos. Estos minerales presentan una mayor solubilidad en ácidos y una estructura cristalina simple (Benavente García ,2020). Sus características mineralógicas son:

Contienen metales combinados con azufre.

Los minerales sulfurados están compuestos por uno o más metales combinados con azufre (S) en forma de sulfuros (S^{2-}). Ejemplos típicos incluyen la pirita (FeS_2), calcopirita ($CuFeS_2$), galena (PbS) y esfalerita (ZnS). Estos compuestos son fuente importante de metales base como cobre, plomo, zinc y hierro.

Alta densidad y dureza variable.

Los minerales sulfurados suelen presentar una alta densidad específica, lo cual facilita su separación por métodos físicos como la flotación o la concentración gravimétrica. Su dureza varía según el tipo: la pirita es bastante dura (6-6.5 en la escala de Mohs), mientras que otros como la galena son más blandos.

Propiedades eléctricas y ópticas distintivas.

Estos minerales suelen ser buenos conductores eléctricos y presentan brillo metálico. Muchos tienen colores opacos y reflejantes, como el dorado de la pirita o el gris plomizo de la galena. Estas propiedades facilitan su identificación microscópica y su análisis mineralógico.

Requieren procesamiento específico (flotación).

Los minerales sulfurados no se benefician fácilmente por métodos físicos convencionales, por lo que generalmente requieren procesos como la flotación diferencial para su concentración. Este proceso aprovecha las propiedades de superficie y afinidad química de los minerales con reactivos específicos (colectores, espumantes, depresores).

Susceptibilidad a la oxidación.

Muchos minerales sulfurados son susceptibles a la oxidación cuando se exponen al aire y la humedad, generando ácido sulfúrico y lixiviados contaminantes (drenaje ácido de mina). Este comportamiento tiene importantes implicancias ambientales y debe ser gestionado adecuadamente durante y después de la operación minera.

2.1.4.3 Variabilidad mineralógica. La variabilidad mineralógica se refiere a los cambios en la composición y asociación de minerales presentes en un yacimiento, los cuales pueden influir significativamente en el comportamiento del mineral durante las etapas de conminución, concentración y recuperación metalúrgica. Esta variabilidad puede manifestarse a escala macroscópica (entre vetas o zonas del depósito) o microscópica (dentro de una misma especie mineral), afectando propiedades clave como la dureza, la liberación de los metales, la reactividad química y la respuesta a los reactivos de flotación. Una caracterización mineralógica insuficiente puede conducir a estrategias de

procesamiento ineficientes, subóptima recuperación de metales y sobrecostos operacionales. Según Nassar et al. (2021), entender la variabilidad mineralógica es esencial para desarrollar modelos predictivos que permitan ajustar los parámetros de operación y asegurar la estabilidad del proceso metalúrgico a lo largo del tiempo.

2.1.5 Factores que afectan la productividad del chancado

2.1.5.1 Tamaño de alimentación. La reducción del tamaño del mineral mediante el proceso de chancado constituye una etapa esencial en la cadena de conminución, la cual se desarrolla de manera progresiva a través de distintas fases. En primer lugar, se realiza un chancado primario o grueso, orientado a fragmentar el material proveniente de mina hasta dimensiones manejables. Posteriormente, se lleva a cabo un chancado fino, que puede comprender varias etapas sucesivas: chancado secundario, terciario e incluso cuaternario, dependiendo de las características del mineral y de los requerimientos granulométricos del proceso posterior.

La selección adecuada de los parámetros operativos del equipo de chancado — como la apertura de descarga, la velocidad de operación, el tipo de revestimiento y la alimentación uniforme— es crucial para evitar condiciones extremas que comprometan la eficiencia del proceso. Estos parámetros deben ajustarse dentro de los rangos recomendados por el fabricante y considerar tanto las propiedades físicas del mineral como los objetivos del circuito. Es importante destacar que, independientemente de otras variables, el tamaño de partícula del mineral alimentado tiene un impacto directo en la velocidad de disolución y, por ende, en el porcentaje de recuperación de metales en un tiempo determinado (Codelco, 2018). Un control inadecuado del tamaño de alimentación puede afectar negativamente la eficiencia energética, generar sobrecargas, aumentar la producción de finos y reducir el rendimiento global del sistema de procesamiento (Codelco, 2018).

2.1.5.2 Consumo energético. El proceso de trituración se determina experimentalmente mediante la medición de la fuerza necesaria. Con base en estos datos, se calcula el Índice de Trabajo o Work Index (Wi), el cual indica la energía específica (en

Kw-hr requerida para reducir el material desde un tamaño inicial promedio (granulometría de alimentación) hasta tamaño final promedio (granulometría del producto).

2.1.5.3 Distribución granulométrica del producto. La distribución granulométrica del producto influye significativamente en la eficiencia del proceso de chancado, ya que determina el rendimiento energético, el tamaño final deseado y el nivel de desgaste de los equipos. Esta variable es clave para lograr una conminución eficiente y sostenible, adaptada a los requerimientos del proceso metalúrgico posterior.

Eficiencia de reducción de tamaño.

Una distribución granulométrica amplia en la alimentación genera una mayor carga de trabajo para el equipo de chancado, pues debe reducir tanto partículas finas como gruesas, lo que compromete la eficiencia operativa. Las partículas de mayor tamaño demandan más energía para su fragmentación, lo cual incrementa el tiempo de residencia y el consumo energético total. Según Kelly y Spottiswood (1982), existe una relación directa entre el tamaño heterogéneo de las partículas y la disminución de la eficiencia energética del proceso, debido a que la carga se distribuye de manera desigual sobre la cámara de chancado.

Consumo de energía.

Una distribución granulométrica más fina requiere un mayor consumo energético, ya que reducir partículas a tamaños más pequeños implica vencer una mayor resistencia mecánica del material, lo cual incrementa la carga específica del equipo. Esta relación se ha demostrado empíricamente en los modelos de energía de conminución, como la Ley de Rittinger y la Ley de Bond, las cuales establecen que el trabajo necesario para reducir el tamaño de partícula es inversamente proporcional al tamaño alcanzado. Por el contrario, si el producto deseado tiene un tamaño más grueso y uniforme, el consumo energético disminuye, haciendo más eficiente la operación (Wills & Napier-Munn, 2015).

Tamaño del producto final.

Controlar la distribución granulométrica del producto es esencial para cumplir con las especificaciones técnicas de las etapas posteriores, como la molienda o flotación. Un

producto excesivamente fino puede ser contraproducente, ya que aumenta el consumo energético y acelera el desgaste de los equipos. Aunque en algunos procesos se requiere un material más fino para mejorar la liberación mineralógica, debe buscarse un equilibrio entre la eficiencia energética y las necesidades del proceso metalúrgico.

Desgaste de los equipos.

El desgaste acelerado de los equipos de chancado asociado a una alimentación extremadamente fina se explica por la necesidad de aplicar fuerzas más precisas y controladas para lograr una fragmentación uniforme. Aunque a primera vista las partículas pequeñas parecerían demandar menos esfuerzo, en la práctica producen un aumento de la fricción interna, vibraciones y acumulación de material en zonas críticas, lo que genera abrasión continua sobre los revestimientos. Estudios técnicos sobre mecanismos de desgaste (Lichter & King, 2001) han demostrado que una distribución de alimentación muy fina incrementa la tasa de desgaste por abrasión y fatiga en componentes como revestimientos, mantos y muelas, reduciendo así la vida útil del equipo.

2.1.6 Modelos y teorías sobre reducción de tamaño

2.1.6.1 Ley de Kick. Postulada en 1885 esta ley afirma que, para cualquier unidad de masa de material, la energía requerida para generar una relación de disminución dada es constante, esto sin considerar el tamaño que pudiese tener la partícula en un inicio (Álvarez Rodríguez, 2010).

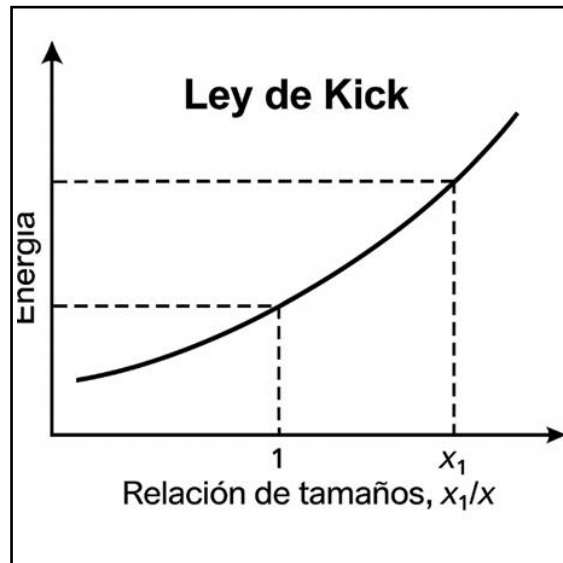
Si definimos K_2 como fuerza necesaria para reducir el tamaño de una partícula a la mitad ($d=D/2$), podemos determinar la energía total requerida para una reducción n veces mayor. Si dividimos la reducción total en r etapas, donde cada etapa reduce el tamaño a la mitad D/n , entonces r será igual al logaritmo en base 2: $n=2^r$ o $r=\text{Log } n/\text{Log } 2$. En consecuencia, la energía total necesaria será directamente proporcional al logaritmo en base 2 de n , pudiendo expresarse como K_3 multiplicado por el logaritmo natural de n , K_2^*

($\text{Log } n/\text{Log } 2$)= $K_3\text{Log } n$:
$$W = K_k * \log\left(\frac{D}{d}\right)$$

$$W = K_k * (\log D - \log d)$$

Figura 7

Ley de Kick



Fuente: Elaboración propia.

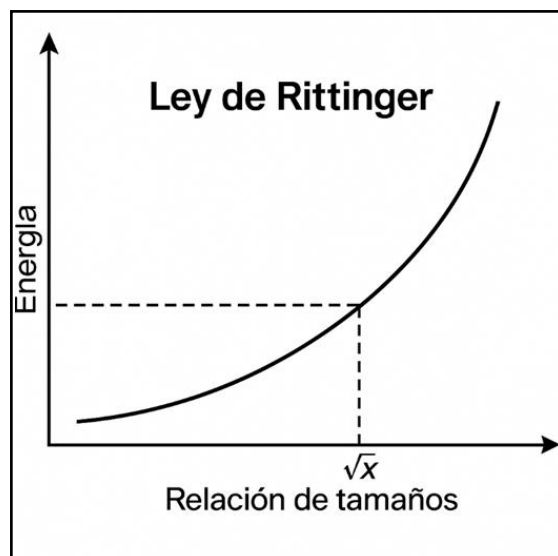
2.1.6.2 Ley Rittinger. En el año 1867 Rittinger postuló que el área de una nueva superficie producida es directamente proporcional a la energía utilizada en la reducción de tamaño. Considerando la ley de Rittinger se puede expresar de la siguiente manera:

$$W = K_R * \left(\frac{1}{d_{80}} - \frac{1}{D_{80}} \right)$$

Donde d_{80} y D_{80} son los tamaños del producto y alimentación respectivamente.

Figura 8

Ley de Rittinger



Fuente: Elaboración propia.

2.1.6.3 Ley de Bond. Energía requerida para reducir el tamaño de un material hasta que el 80% de las partículas tenga un tamaño determinado es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tamaño de las partículas en ese mismo porcentaje.

Según Bond, el parámetro KB se define en función del Work Index (WI), que representa la cantidad total de trabajo necesario, desde un tamaño teóricamente infinito hasta que el 80% de las partículas sean más pequeñas que 100 micrómetros (μm).

$$E_B = 10W_I * \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

Donde:

E_B = Energía específica de conminución.

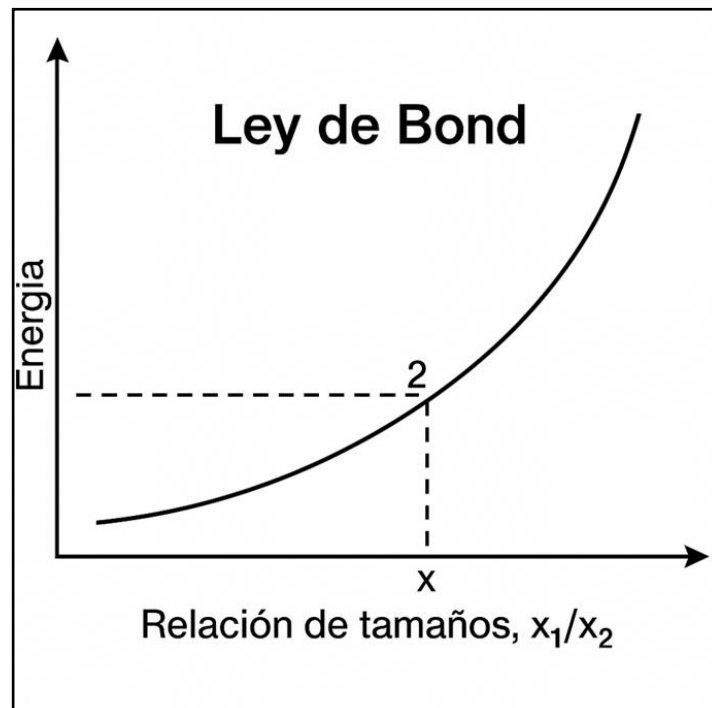
W_I = Work index.

P_{80} = Tamaño del 80% acumulado pasante en el producto.

F_{80} = Tamaño del 80% acumulado pasante en la alimentación.

Figura 9

Ley de Bond



Fuente: Elaboración propia.

El índice de trabajo (WI) caracteriza la dificultad de reducir el tamaño de un material. El WI, en particular, está influenciado tanto por las propiedades intrínsecas del material, como su dureza, como por las características del equipo empleado en el proceso, debe ser obtenido experimentalmente para cada caso particular. Este parámetro proporciona una medida de la resistencia a la fragmentación y de eficiencia del equipo de conminución.

Las principales ventajas del test de Bond son:

- La gran disponibilidad de datos para análisis.
- Su eficacia para realizar cálculos preliminares.
- Es una opción sencilla y eficaz para evaluar el desempeño mecánico de los equipos de conminución.

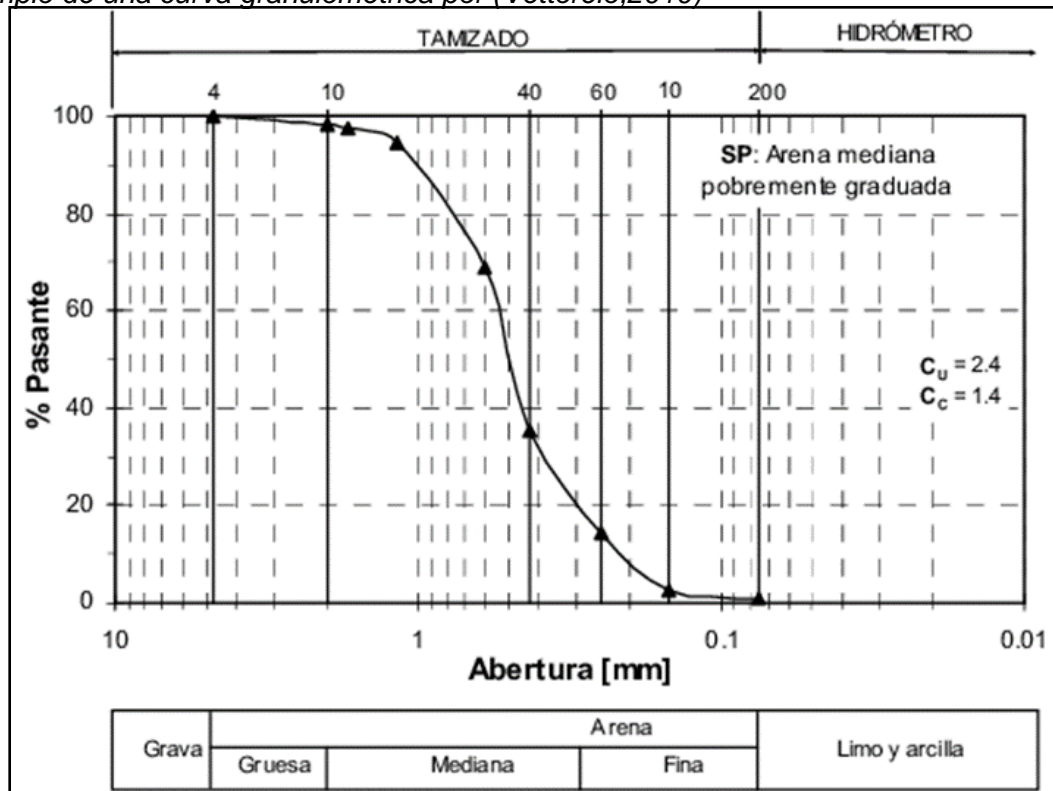
2.1.6.4 Curvas de distribución granulométrica. Una curva de distribución granulométrica es una representación aproximada de la realidad, ya que existen limitaciones físicas que dificultan obtener muestras estadísticamente representativas. Además, como no es posible determinar el tamaño exacto de cada partícula de manera individual, se agrupan los materiales en rangos de tamaño definidos.

Para realizar un análisis estadístico de estas distribuciones, se emplean parámetros como la media de la muestra y la desviación estándar, descritos por autores como Bunte. Las unidades en que se expresan estos parámetros suelen representarse en el sistema Phi.

Existen diversas clasificaciones granulométricas, diseñadas para diferentes tipos de materiales. Algunas se enfocan específicamente en suelos finos o gruesos, mientras que otras abarcan ambas categorías. Entre las clasificaciones más utilizadas se encuentran la Internacional, la de M.I.T., la de Kopecky y el método de conteo de partículas de Pebble Wolman (Manquillo, 2007).

Figura 10

Ejemplo de una curva granulométrica por (Vettorelo,2010)



Fuente: Elaboración propia.

2.1.7 Importancia del tamaño de alimentación en el procesamiento de minerales

2.1.7.1 Interacción con otras etapas. La dimensión de las partículas que ingresan al chancador ejerce una influencia significativa en el desempeño global del proceso de reducción de tamaño. Una granulometría adecuada garantiza una mayor eficiencia en términos de productividad, al tiempo que minimiza el consumo energético y el desgaste de equipos. Además, la calidad del producto obtenido en el chancado, que se ve afectada por la distribución de tamaños de las partículas, es un factor crítico para las etapas posteriores del proceso metalúrgico, como la molienda y la flotación, las cuales requieren un material con características específicas para asegurar una óptima recuperación de los minerales de interés.

2.1.7.2 Importancia del tamaño de alimentación.

Optimización del chancado.

Garantizar que el tamaño de alimentación esté dentro del rango recomendado permite que el chancador funcione a su máxima capacidad. Un material excesivamente

grande puede provocar obstrucciones y aumentar el desgaste del equipo, mientras que tamaños muy pequeños implican energía desperdiciada al procesar partículas ya adecuadas (Wills & Napier-Munn, 2015).

Eficiencia energética.

Depende de la relación entre el tamaño inicial y final del material. Según la Ley de Bond, reducir partículas grandes demanda más energía que reducir partículas menores, lo que hace indispensable regular el tamaño de alimentación para controlar los costos energéticos

Conexión con la molienda.

Una alimentación homogénea y de tamaño adecuado facilita una molienda más eficiente, minimizando variaciones en las partículas que ingresan al molino. Esto mejora la liberación de minerales valiosos y optimiza el uso de energía en la molienda (Kelly & Spottiswood, 1982).

Impacto en la recuperación metálica.

La granulometría del material ejerce una influencia significativa y directa para eficiencia en procesos como de flotación. Partículas de gran tamaño pueden encerrar los minerales de interés, dificultando su liberación, mientras que partículas extremadamente finas tienden a formar lodos o ser arrastradas por las burbujas de aire, lo que reduce la selectividad del proceso y puede conducir a la pérdida de material valioso en los relaves. Por lo tanto, una distribución de tamaños de partículas adecuada en la flotación y garantizar una recuperación eficiente de los minerales de interés.

2.1.8 Tecnologías y tendencias en chancado

2.1.8.1 Automatización y monitoreo de proceso. La incorporación de sistemas de control automatizados en los procesos de chancado ha transformado radicalmente la manera en que se llevan a cabo estas operaciones. Al automatizar las tareas repetitivas y peligrosas, se reduce significativamente el riesgo de accidentes laborales y se mejora la seguridad del personal. Además, la automatización permite optimizar los parámetros de operación de los equipos, una reducción en el consumo energético y una mayor

disponibilidad de los equipos. Como resultado, se obtiene un producto final de mayor calidad y consistencia, lo que a su vez incrementa la valorización del producto y la rentabilidad del proceso.

Aumento de la eficiencia.

Gracias a la automatización, el arranque y el paro de los equipos se llevan a cabo de manera secuencial, lo que permite optimizar los tiempos de ciclo y minimizar las pérdidas asociadas a paradas no programadas.

Al automatizar tareas repetitivas, se supera ampliamente la capacidad humana en términos de velocidad y precisión, lo que conlleva un incremento en la productividad y una disminución significativa de los errores.

La automatización permite una mejor gestión de los recursos, optimizando el uso de energía, materias primas y tiempo de trabajo.

Mejora de la seguridad.

Los sistemas automatizados pueden operar en entornos peligrosos o difíciles para los humanos, protegiendo a los trabajadores de riesgos laborales.

La automatización facilita la incorporación de sistemas de seguridad más avanzados, capaces de identificar y reaccionar ante fallos de manera rápida y eficaz, lo que contribuye a prevenir accidentes y minimizar daños en los equipos.

Incremento de la rentabilidad.

La optimización de la eficiencia y la disminución de pérdidas en el proceso productivo contribuyen a reducir significativamente el costo por tonelada del producto. Además, la automatización incrementa la capacidad de la planta al permitir un mayor volumen de producción en el mismo período de tiempo. Por otro lado, el control preciso del proceso mejora la calidad del producto final, lo que puede generar un mayor valor percibido por el cliente.

Facilidad de operación y monitoreo.

Las interfaces gráficas proporcionadas por los sistemas SCADA e HMI ofrecen una representación visual clara y concisa del estado de los procesos industriales, lo que facilita

la toma de decisiones por parte del operador y del ingeniero de planta. Al presentar la información de manera organizada e intuitiva, estos sistemas permiten identificar rápidamente desviaciones del proceso, diagnosticar fallas y tomar las medidas correctivas necesarias.

La automatización también habilita el manejo remoto de las operaciones desde una sala de control centralizada, lo cual aumenta tanto la comodidad como la seguridad para el personal.

Además, estos sistemas automatizados registran detalladamente las variables del proceso, proporcionando datos valiosos que facilitan el análisis del desempeño y la identificación de áreas con potencial de mejora (Díaz, 2010).

Nuevas tecnologías.

La incorporación de la tecnología HPGR, ha revolucionado los procesos de conminución, ofreciendo una alternativa más eficiente y sostenible a los métodos tradicionales. Al aplicar altas presiones entre dos rodillos, esta tecnología permite una reducción en los costos de operación, entre sus múltiples beneficios, se puede destacar:

- **Aumento del tonelaje procesado**

El HPGR permite un aumento considerable en el tonelaje de mineral procesado, esto se debe a la capacidad del equipo para generar un producto más fino y uniforme facilitando el proceso de molienda posterior.

- **Disminución del Work Index**

Debido al mecanismo de ruptura inter-partícula del HPGR, que genera microfisuras en las partículas del mineral, esto disminuye la energía requerida para su fractura, es decir, disminuye el work index.

- **Eficiencia energética**

La tecnología HPGR ofrece la posibilidad de consolidar varias etapas de chancado y moliendas convencionales en un solo equipo, lo que se traduce en un ahorro energético considerable de toda la planta.

- **Disminución del consumo de medios moledores**

Se basa en la auto-molienda del material, es decir; este diseño permite que las partículas de mineral se fragmenten al colisionar entre sí, lo que reduce drásticamente el desgaste de medios moledores de acero en los molinos convencionales.

- **Mayor ciclo de vida de revestimientos de chancadoras terciarias**

Permite operar las chancadoras terciarias bajo condiciones menos agresivas, lo que incrementa significativamente la vida de los revestimientos internos, disminuyendo así los costos de mantenimiento asociados a su reemplazo.

- **Mayor control granulométrico.**

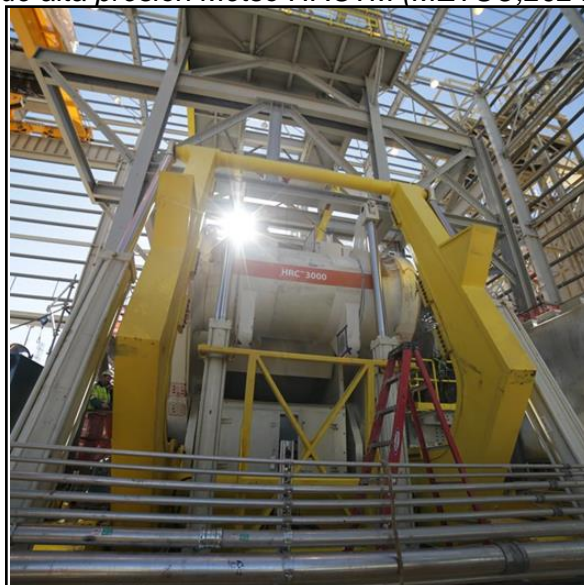
- **Menor generación de finos.**

Debemos también considerar dos aspectos importantes que podrían suponer un impedimento hacia el paso de esta nueva tecnología:

- Requiere de una mayor inversión inicial significativa
- Al aumentar considerablemente el tonelaje procesado por el HPGR se requerirá una mayor capacidad en cuanto a los sistemas de recuperación de agua (Tocto,2023).

Figura 11

Rodillos de molienda de alta presión Metso HRCTM (METSO,2024)



Fuente: Elaboración propia.

2.1.9 Influencia del tamaño de alimentación en la productividad del chancado

Una alimentación con una granulometría adecuada permite una mejor interacción con los elementos de trituración, optimizando la fragmentación del material y reduciendo la probabilidad de atascos dentro de la cámara de chancado. Si la alimentación es excesivamente gruesa, se generan mayores esfuerzos mecánicos en la chancadora, incrementando el desgaste de los revestimientos y reduciendo la vida útil de los componentes internos. En cambio, un material con un tamaño más uniforme permite un desgaste homogéneo de las superficies de contacto, mejorando la eficiencia operativa y minimizando los costos de mantenimiento.

La productividad del chancado se ve afectada directamente por la variabilidad del tamaño de alimentación. En los casos en que se alimenta material con una granulometría heterogénea, se producen fluctuaciones en la carga del equipo, lo que genera una reducción en la eficiencia energética y en la tasa de producción. Para mitigar estos efectos, se recomienda implementar un sistema de preclasificación con cribas vibratorias, que permitan separar los finos antes del ingreso a la chancadora, evitando una sobrecarga innecesaria. La optimización de la granulometría de alimentación no solo mejora la capacidad de procesamiento, lo cual puede afectar negativamente las etapas posteriores de molienda y concentración.

El diseño de la tolva de alimentación también es un factor relevante en el control del tamaño de entrada al chancador. Un diseño inadecuado puede generar segregación del material, donde las partículas gruesas tienden a acumularse en el centro y las finas en los bordes, ocasionando una alimentación desigual. Para evitar este problema, se recomienda el uso de alimentadores vibratorios o de placas que garanticen una distribución uniforme del material en la entrada del equipo. De este modo, se mejora la estabilidad operativa y se evita la formación de puntos de alta presión que puedan provocar daños en la estructura del chancador.

Figura 12

Tamaño de alimentación



Fuente: Elaboración propia.

2.1.9.1 Relación entre granulometría y eficiencia del chancado. Ingresan al proceso influye directamente en la capacidad de reducción y en la estabilidad operativa del circuito de chancado. Cuando la granulometría es uniforme y acorde a las especificaciones del equipo, se maximiza la eficiencia de reducción de tamaño y se minimizan las pérdidas por sobrecarga o generación de finos excesivos.

Un control deficiente de la granulometría puede generar diversos problemas operacionales. Por ejemplo, si el material de alimentación presenta un alto contenido de partículas gruesas, la chancadora puede experimentar bloqueos y atascos, reduciendo la tasa de producción y aumentando los tiempos de inactividad. En contraste, una alimentación compuesta mayoritariamente por finos puede generar un consumo energético elevado sin una mejora significativa en la eficiencia de reducción. Por esta razón, el equilibrio en la granulometría de alimentación es un aspecto clave en la optimización del proceso de chancado.

El uso de cribas de clasificación antes del chancado es una estrategia efectiva para regular la granulometría de alimentación. Estas cribas permiten eliminar el material fino que no requiere reducción adicional y aseguran que solo las partículas con un tamaño adecuado ingresen a la chancadora. Como resultado, se optimiza el uso de la energía y se prolonga la vida útil de los componentes del equipo. Además, una granulometría controlada mejora la eficiencia en la etapa de molienda, ya que la reducción de tamaño es más homogénea y predecible.

Adicionalmente, la optimización de la relación de reducción es esencial para mejorar la eficiencia del chancado. Un ajuste adecuado del reglaje de la chancadora, en función de la granulometría de alimentación, permite alcanzar una mayor productividad y reducir los costos operacionales. Los avances tecnológicos han permitido la incorporación de sistemas de monitoreo en tiempo real para analizar la granulometría del material en proceso y ajustar automáticamente los parámetros operativos del equipo.

$$V = \frac{1}{2}(A + B)h$$

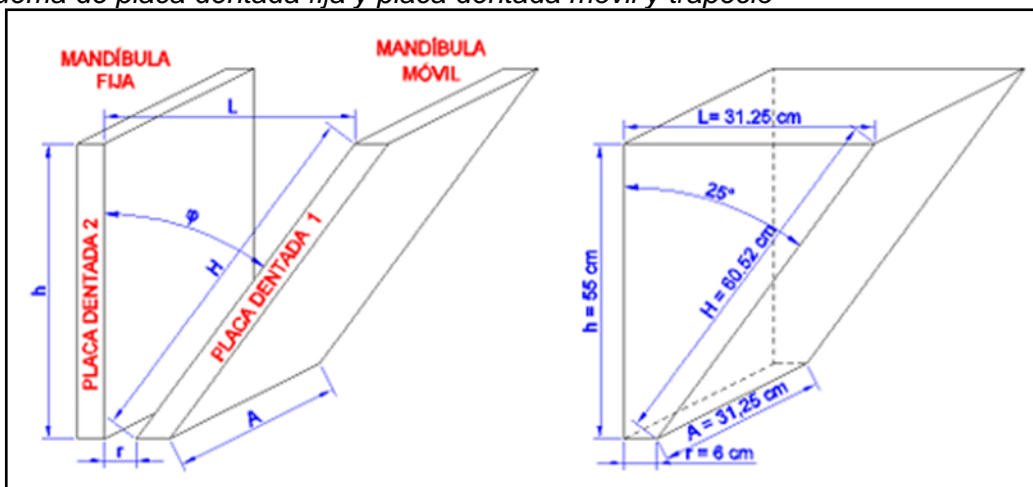
A = longitud de la base mayor del trapecio (dimensión de la mandíbula fija).

B = longitud de la base menor (dimensión de la mandíbula móvil).

h = altura del trapecio (distancia entre placas dentadas).

Figura 13

Esquema de placa dentada fija y placa dentada móvil y trapecio



Fuente: Elaboración propia.

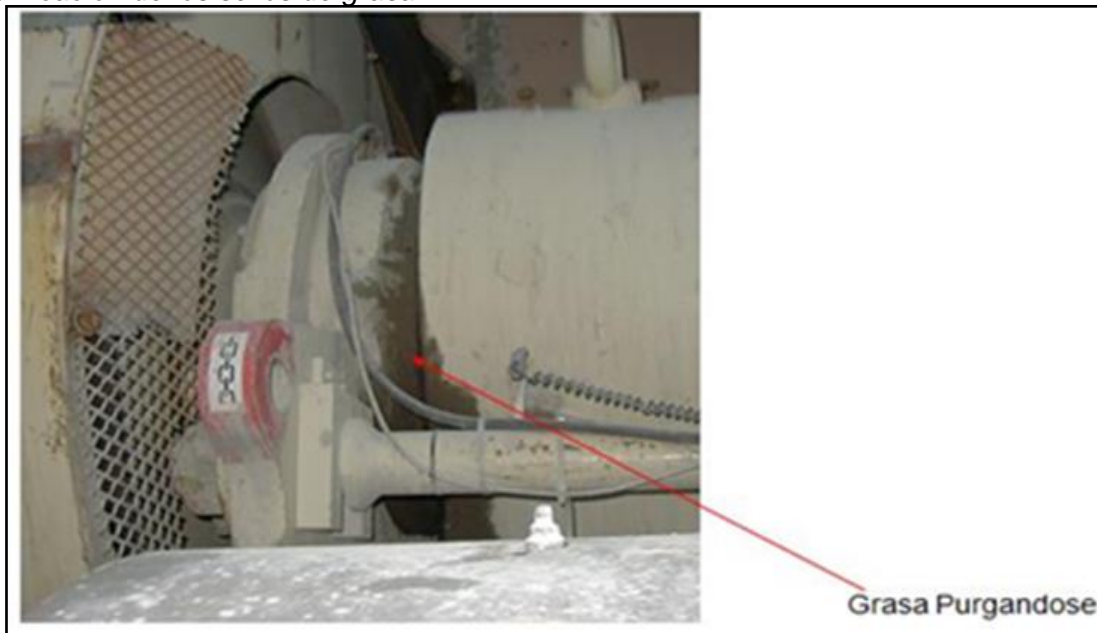
2.1.9.2 Impacto en la reducción de costos operativos y consumo energético.

Es un aspecto crucial en la rentabilidad de la operación minera. Una correcta clasificación del material antes del chancado permite minimizar el desperdicio de energía y optimizar el desempeño del equipo, reduciendo significativamente los costos asociados a mantenimiento y consumo eléctrico.

Cuando el tamaño de alimentación no está bien controlado, la chancadora necesita aplicar una mayor cantidad de energía para fragmentar el material. En cambio, una granulometría adecuada reduce la carga innecesaria sobre el equipo y permite alcanzar la fragmentación deseada con un menor esfuerzo. Como el acero de los revestimientos y los medios de molienda.

Figura 14

Verificación de los sellos de grasa



Fuente: Elaboración propia.

Relacionada con la disminución del tiempo de inactividad del equipo. Un material de alimentación homogéneo y bien controlado evita interrupciones en el proceso y reduce la necesidad de intervenciones correctivas. También incrementa la disponibilidad del equipo y permite un mejor aprovechamiento.

Figura 15

Temperatura de los baleros



Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de tecnologías avanzadas de monitoreo ha permitido implementar estrategias de optimización energética en el chancado. Sensores de presión y temperatura, combinados con algoritmos de control automático, pueden ajustar la operación de la chancadora en función de las condiciones del material de alimentación. Esto garantiza que el equipo opere en su punto óptimo de eficiencia, minimizando el desperdicio de energía y maximizando la producción de mineral procesado.

El monitoreo de variables como temperatura, presión y vibraciones permite detectar posibles fallas antes de que ocurran. La integración de estos sistemas con plataformas de análisis de datos facilita la toma de decisiones basada en información en tiempo real, asegurando que la operación se mantenga en su punto óptimo de eficiencia (Ramos, 2019).

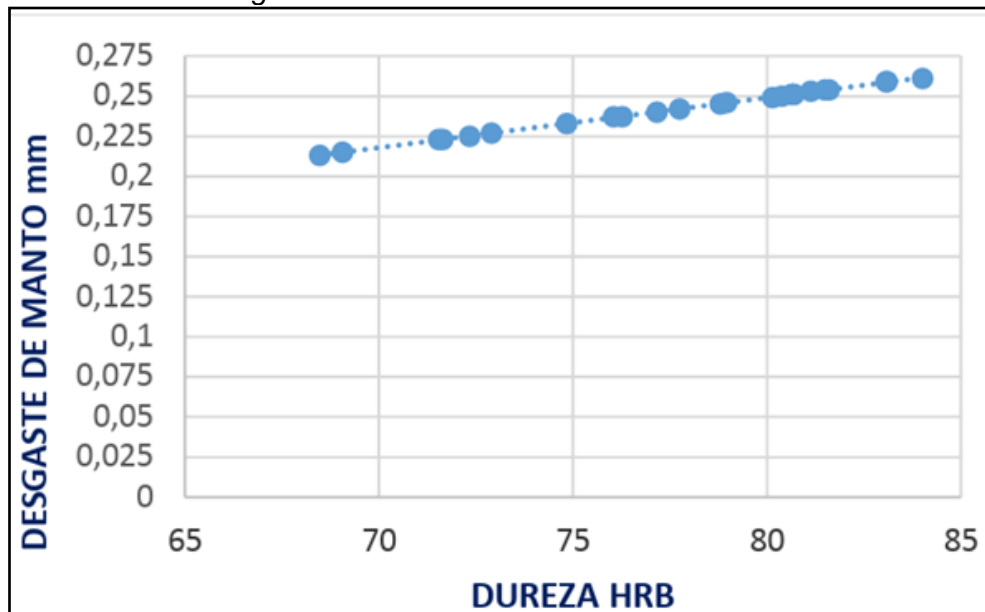
2.1.10 Optimización del chancado en función de la dureza y composición del mineral

Su eficiencia depende en gran medida de la dureza y composición mineralógica del material alimentado. Los minerales con alta dureza, como la cuarzo-pirita, presentan una mayor resistencia a la conminución, lo que implica un mayor desgaste en los revestimientos

de los equipos de chancado y un mayor consumo de energía. En cambio, los minerales más blandos, como las calizas, pueden ser triturados con menor esfuerzo mecánico, pero tienden a generar un mayor volumen de finos, lo que afecta la eficiencia del circuito de molienda. La optimización del chancado en función de la dureza implica la selección adecuada de los parámetros operativos del chancador, el tipo de revestimientos y la frecuencia de reemplazo de estos componentes.

Figura 16

Dureza de mineral vs desgaste de manto



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la composición mineralógica es otro factor clave en la optimización del chancado. Algunos minerales, como los silicatos, presentan propiedades abrasivas que aceleran el desgaste de los mantos y cóncavos de las chancadoras, reduciendo su vida útil. Además, la presencia de materiales arcillosos puede afectar la fluidez del mineral dentro de la cámara de chancado, generando acumulaciones indeseadas que reducen la eficiencia operativa. Para contrarrestar estos efectos, se han desarrollado estrategias como la preclasificación del mineral, el uso de aditivos que mejoran la fluidez y la implementación de sensores que permiten monitorear en tiempo real las características del material alimentado al chancador.

La optimización del chancado también considera la adaptación de la velocidad angular del eje principal del chancador en función de la dureza del mineral procesado. Un incremento en la velocidad de rotación permite reducir el tamaño de las partículas de mineral de mayor dureza, pero también genera un mayor desgaste en los revestimientos del equipo. Por otro lado, una velocidad demasiado baja puede provocar un efecto de compactación dentro de la cámara de chancado, reduciendo la eficiencia del proceso. En este contexto, el ajuste dinámico de la velocidad angular, basado en sensores de dureza en línea.

El monitoreo de la eficiencia del chancador en función de la dureza y composición del mineral ha llevado al desarrollo de modelos matemáticos que permiten predecir el desgaste de los componentes en función de las condiciones operativas. Estos modelos se basan en ecuaciones empíricas que relacionan la dureza del mineral con la tasa de desgaste de los mantos y cóncavos. La validación de estos modelos mediante estudios experimentales ha permitido establecer parámetros óptimos de operación, asegurando un equilibrio entre la productividad y la durabilidad de los equipos.

2.1.10.1 Índice de Bond y su relación con el chancado. Es un parámetro fundamental en el diseño y operación de los circuitos de chancado y molienda, ya que permite estimar la energía específica requerida para la reducción de tamaño del mineral. Este índice se obtiene a partir de ensayos de laboratorio estandarizados que determinan bajo condiciones controladas. Su cálculo se basa en la siguiente ecuación:

$$Wi = \frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}}$$

Donde:

Wi = es el índice de Bond en kWh/t.

$P80$ = es el tamaño de partícula del producto al 80% pasante (en micras).

$F80$ = es el tamaño de partícula de la alimentación al 80% pasante (en micras).

Valores elevados de este índice indican que el material requiere una mayor cantidad de energía para su reducción, lo que impacta directamente en el consumo

energético de la planta y en la selección de los equipos adecuados para el proceso. En contraste, valores bajos de W_i sugieren que el material puede ser triturado con menor esfuerzo mecánico.

El cálculo del índice de Bond ha sido complementado en los últimos años con técnicas avanzadas de caracterización mineralógica, como la espectroscopia de infrarrojo y la microscopía electrónica de barrido. Estas herramientas permiten una evaluación más precisa, proporcionando información clave para la optimización del proceso de chancado.

2.1.10.2 Variabilidad mineralógica y su efecto en la eficiencia del proceso. La variabilidad mineralógica es un factor crítico que afecta la eficiencia del chancado. Los yacimientos mineros presentan una composición heterogénea, con variaciones en la proporción de minerales duros y blandos, así como en la presencia de impurezas que pueden alterar el comportamiento del material en el proceso de chancado. Por ejemplo, minerales como el cuarzo y la magnetita presentan una alta resistencia a la fractura, lo que requiere un mayor esfuerzo mecánico y un mayor consumo energético para su reducción de tamaño. En contraste, minerales más blandos, como las calizas o ciertos feldespatos, pueden fragmentarse con facilidad, pero generan una mayor cantidad de finos que pueden afectar la eficiencia.

La presencia de minerales arcillosos en la alimentación del chancador representa otro desafío importante, ya que estos materiales tienden a generar adherencias en las superficies de trituración, afectando la eficiencia operativa del equipo. Cuando las arcillas se mezclan con humedad, pueden formar aglomerados que obstruyen la cámara de chancado, reduciendo la capacidad de procesamiento y provocando paradas no programadas para la limpieza del sistema. Para mitigar este problema, se han implementado estrategias como la clasificación previa del mineral mediante harneros vibratorios, la reducción del contenido de humedad en la alimentación y la incorporación de agentes dispersantes que facilitan el flujo del material dentro del chancador. Estas medidas han demostrado ser efectivas para mantener la estabilidad del proceso y evitar pérdidas de productividad.

El impacto de la variabilidad mineralógica no solo se refleja en la eficiencia del chancado, sino también en el desgaste de los componentes del equipo. La abrasividad del mineral influye en la velocidad de desgaste de los revestimientos y cóncavos del chancador, reduciendo su vida útil y aumentando la necesidad de reemplazos frecuentes. Para evaluar este efecto, se han desarrollado pruebas de abrasividad estandarizadas, como el ensayo de desgaste de Bond y el índice de abrasión de Bond, que permiten caracterizar la capacidad de un mineral para generar desgaste en los equipos de conminución.

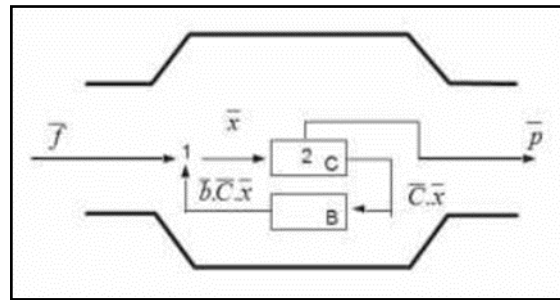
Los avances en la automatización han permitido mejorar la gestión de la variabilidad mineralógica en el chancado. Sensores de dureza y espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) han sido implementados en varias operaciones mineras para analizar la composición del mineral antes de su ingreso al chancador, lo que permite realizar ajustes dinámicos en los parámetros de operación. De esta manera, es posible optimizar la velocidad de alimentación, la presión de trituración y la configuración del equipo para adaptarse a las características del material procesado. Estas innovaciones han demostrado ser clave para mejorar la eficiencia energética del proceso, reducir el consumo de insumos y prolongar la vida útil de los componentes del chancador (Caballero, 2017).

2.1.11 Modelos matemáticos y simulación del proceso de chancado

El modelamiento matemático aplicado al chancado es una herramienta fundamental en la optimización del proceso de conminución, ya que permite predecir el comportamiento del material y mejorar la eficiencia energética de los equipos de trituración. La simulación numérica ha demostrado ser una estrategia efectiva para analizar los parámetros operacionales y ajustar las condiciones de trabajo de los chancadores, minimizando así el consumo energético y el desgaste de los componentes. Los modelos matemáticos permiten evaluar la interacción entre las partículas y los elementos de trituración, considerando factores como la dureza del mineral, la distribución granulométrica de la alimentación y la geometría de la cámara de chancado.

Figura 17

Circuito de chancado



Fuente: Elaboración propia.

Uno de los enfoques más utilizados en la modelización del chancado es el balance poblacional. Este modelo considera la función de fractura acumulada y la función de clasificación, que determinan la cantidad de material que se romperá en fragmentos de menor tamaño y la probabilidad de que cada partícula permanezca en la cámara de trituración antes de ser descargada. La formulación matemática del balance poblacional se expresa mediante ecuaciones diferenciales que describen la evolución de la granulometría a lo largo del proceso.

$$p = (I - CB)^{-1}Cf$$

Donde:

p = Distribución granulométrica del producto.

f = Distribución granulométrica de la alimentación.

C = Función de clasificación.

B = Función de fractura acumulada.

I = Matriz identidad.

El modelamiento también permite predecir la eficiencia de fragmentación del mineral a partir de funciones empíricas y teóricas que relacionan la dureza del material con la energía específica requerida para su conminución. Para estimar el consumo energético del proceso, proporcionando una base matemática para el dimensionamiento y control de los chancadores. La integración de modelos matemáticos con herramientas de simulación computacional ha permitido optimizar la operación.

La simulación computacional basada en modelos matemáticos ha sido complementada con métodos numéricos como el Método de Elementos Discretos (DEM), el cual permite analizar el comportamiento dinámico de las partículas dentro de la cámara de chancado. Esta metodología considera las interacciones entre partículas, los efectos de cohesión y abrasión, así como la geometría de los revestimientos y los perfiles de desgaste. La combinación de modelos matemáticos con simulaciones DEM ha demostrado ser una herramienta efectiva para la optimización del proceso, facilitando la identificación de parámetros operacionales óptimos y minimizando el impacto del desgaste sobre los componentes del chancador.

2.1.11.1 Aplicación de la Ley de Bond en la predicción del consumo energético. Este modelo se basa en la relación entre la energía específica requerida para la reducción de tamaño del material y el índice de Bond, el cual es una medida de la resistencia del mineral a la fractura.

El uso de la ley de Bond en la predicción del consumo energético del chancado permite optimizar la selección de los equipos de conminución y ajustar los parámetros. La integración de este modelo con herramientas de simulación computacional ha permitido validar su aplicabilidad en condiciones reales de operación, proporcionando una base científica para la toma de decisiones en el diseño y control de los circuitos de chancado.

2.1.11.2 Simulación DEM (Discrete Element Method) para la optimización del chancado. Utilizada para modelar el comportamiento de partículas individuales dentro de sistemas de conminución. Este enfoque permite analizar la interacción entre las partículas y los revestimientos del chancador, evaluando parámetros como la velocidad de colisión, la distribución de fuerzas y la eficiencia de fragmentación del material. La simulación DEM ha sido ampliamente aplicada en la industria minera para optimizar el diseño de los revestimientos.

Uno de los principales beneficios del uso de DEM en la optimización del chancado es la capacidad de predecir la distribución de tamaños de partículas en función de las condiciones operativas del equipo. La modelización de la cinemática de las partículas

permite evaluar el impacto de variables como la velocidad de alimentación, la configuración de los revestimientos y la geometría de la cámara de chancado en la eficiencia del proceso. La integración de simulaciones DEM con modelos matemáticos ha demostrado ser una herramienta poderosa para la optimización del chancado.

El desarrollo de algoritmos avanzados en la simulación DEM ha permitido incorporar efectos como la adhesión de partículas, la fractura progresiva y la distribución de esfuerzos en los componentes del chancador. Estos avances han permitido mejorar la precisión de las predicciones. La combinación de la simulación DEM con el modelamiento matemático ha abierto nuevas posibilidades para el diseño y control de los circuitos de chancado, contribuyendo a la mejora de la eficiencia energética y la reducción del desgaste de los equipos (Osorio y otros, 2014).

2.1.12 Eficiencia energética y reducción del consumo en el chancado

El chancado es una de las etapas de mayor consumo energético en la minería, lo que impulsa la búsqueda de alternativas más eficientes para reducir costos operacionales y disminuir el impacto ambiental. Dentro de estas alternativas, se ha explorado la optimización de los equipos convencionales mediante mejoras en su diseño, ajustes en los parámetros operativos y la implementación de nuevas tecnologías. El tipo de equipo utilizado y la configuración del circuito de conminución. Una reducción efectiva del tamaño del mineral en esta etapa permite disminuir la demanda energética en las fases posteriores de molienda, optimizando el uso de la energía en el procesamiento total del mineral.

Además, la incorporación de sistemas de monitoreo en tiempo real permite evaluar la variabilidad del mineral alimentado y ajustar automáticamente las condiciones de operación para maximizar la eficiencia energética. Este enfoque ha demostrado ser particularmente útil en yacimientos con características mineralógicas variables, donde la dureza del material puede cambiar significativamente de un lote a otro. Otro enfoque para la reducción del consumo energético en el chancado es la integración de tecnologías más avanzadas, como los rodillos de molienda de alta presión (HPGR), que presentan una mayor eficiencia en la reducción del tamaño de partículas en comparación con los

chancadores convencionales. Estos equipos utilizan un mecanismo de compresión para fracturar el mineral, generando una mayor proporción de partículas finas y reduciendo la necesidad de molienda posterior. Además, la aplicación de prechancado mediante HPGR en combinación con molienda SAG ha demostrado reducir el consumo de energía por tonelada procesada, optimizando el balance energético del circuito de conminución.

También está relacionado con la selección y configuración del circuito de conminución. En algunos casos, la eliminación de etapas intermedias de chancado secundario o terciario mediante la optimización del chancado primario puede reducir el consumo global de energía, mejorando la productividad sin comprometer la calidad del producto final. Sin embargo, estas modificaciones requieren un análisis detallado del comportamiento del mineral y de la capacidad de los equipos, ya que la reducción de etapas puede incrementar la carga de trabajo en la molienda, afectando la eficiencia general del proceso

2.1.12.1 Comparación entre chancado convencional y tecnologías de alta presión (HPGR). El chancado convencional, ha sido el estándar en la industria minera durante décadas. Estos equipos operan mediante la aplicación de fuerzas de compresión y corte sobre el mineral, logrando una reducción progresiva del tamaño de partícula. No obstante, presentan limitaciones en términos de eficiencia energética, ya que una parte significativa de la energía aplicada se disipa en forma de calor y vibraciones, sin contribuir directamente a la fragmentación del mineral.

En contraste, representan una tecnología más eficiente, basada en la compresión uniforme del mineral entre dos rodillos de alta presión. Este mecanismo de fractura induce microfisuras en las partículas, facilitando su posterior molienda y reduciendo el consumo de energía en etapas posteriores del procesamiento. Estudios han demostrado que el uso de HPGR puede disminuir el consumo energético hasta en un 30% en comparación con el chancado convencional, dependiendo de las características del mineral y de la configuración del circuito.

Además de la eficiencia energética, los HPGR presentan ventajas adicionales, como una menor generación de finos y una distribución granulométrica más homogénea, lo que mejora la eficiencia de separación en procesos posteriores de concentración. Sin embargo, su implementación requiere una evaluación detallada de la dureza del mineral y del comportamiento de los fragmentos generados, ya que algunos materiales pueden presentar problemas de compactación que afectan la eficiencia del equipo.

A pesar de sus ventajas, la adopción de HPGR en la industria minera aún enfrenta ciertos desafíos, como los costos de inversión inicial más elevados y la necesidad de un diseño optimizado del circuito de conminución. No obstante, en yacimientos con alta dureza del mineral o en operaciones que buscan maximizar la eficiencia energética.

2.1.12.2 Relación entre la granulometría y el consumo energético por tonelada procesada. La relación entre la granulometría del material alimentado y el consumo energético del chancado es un factor crítico en la optimización del proceso. Una alimentación con una granulometría más gruesa requiere una mayor aplicación de energía para su reducción, lo que incrementa el consumo específico de los equipos. En este sentido, la optimización del tamaño de alimentación mediante estrategias como el prechancado o el uso de clasificación previa puede contribuir a una reducción significativa del consumo energético por tonelada procesada.

El ajuste de la granulometría de alimentación no solo impacta el chancado, sino que también tiene repercusiones en la eficiencia de la molienda. Una reducción controlada del tamaño de partícula antes de la molienda SAG puede disminuir la demanda energética de esta etapa, optimizando el uso global de la energía en el proceso de conminución. Por ejemplo, estudios han demostrado que una disminución en el tamaño de alimentación al molino SAG de 150 mm a 80 mm puede reducir el consumo energético de la molienda en un 20%, lo que representa un ahorro significativo en operaciones de gran escala.

Otro aspecto relevante en la relación entre granulometría y consumo energético. Una alimentación con una granulometría más homogénea permite una mejor distribución de la carga en los equipos de chancado, evitando picos de consumo energético y

reduciendo el desgaste de los componentes mecánicos. En este sentido, la implementación de tecnologías de clasificación avanzada y el control automatizado de la alimentación pueden contribuir a mejorar la eficiencia energética del proceso (Silva, 2013).

2.1.13 Curvas granulométricas y su impacto en la optimización del chancado

Una curva granulométrica bien definida proporciona información clave sobre la eficiencia del chancado, identificando si el equipo está operando dentro de los parámetros óptimos o si requiere ajustes en sus condiciones operativas. Estas curvas se generan a partir de ensayos de tamizado, donde se mide la proporción de material retenido en una serie de mallas con aberturas progresivamente menores. La interpretación de estos resultados permite evaluar el rendimiento del equipo, la calidad del producto obtenido y la necesidad de modificaciones en la configuración del circuito de chancado.

El impacto de las curvas granulométricas en la optimización del chancado es significativo y en la calidad del material entregado a las etapas posteriores de molienda y concentración. Una curva con una pendiente pronunciada indica que el producto chancado presenta una distribución de tamaños más uniforme, lo que favorece el rendimiento del molino SAG y reduce la carga circulante en el circuito. En contraste, una curva granulométrica más dispersa sugiere una presencia significativa de partículas finas y gruesas, lo que puede afectar negativamente la eficiencia del proceso, incrementando la demanda energética y generando una fragmentación ineficiente del mineral. Para corregir estas desviaciones, se pueden realizar ajustes en la configuración del chancador, como la variación del reglaje o la modificación de la velocidad de alimentación.

El análisis de las curvas granulométricas también permite evaluar la capacidad del equipo para manejar diferentes tipos de mineral, especialmente en yacimientos donde la dureza y la composición mineralógica pueden variar significativamente. En estos casos, una curva granulométrica fuera del rango esperado puede ser una señal de que el chancador no está operando en condiciones óptimas, lo que requiere una revisión de la estrategia de alimentación y un ajuste en los parámetros operacionales. En operaciones donde se procesan minerales de alta dureza, es común observar un aumento en la fracción

de partículas gruesas, lo que puede reducir la eficiencia del chancado y aumentar la carga de trabajo en la molienda.

Tecnologías avanzadas como la espectroscopia de difracción láser y los analizadores en línea permiten obtener datos granulométricos. La implementación de estos sistemas en las plantas de procesamiento ha demostrado ser clave para mantener la estabilidad del circuito de chancado, reduciendo las variaciones operativas y mejorando la eficiencia del proceso. Además, el uso de modelos matemáticos basados en balance de masa y ecuaciones empíricas permite predecir la evolución de la granulometría del material en función de los cambios en las condiciones operativas.

Relación de eficiencia del chancado con la distribución de tamaños:

$$E = \frac{P80 - P20}{F80 - F20}$$

Donde:

E = Eficiencia del chancado.

$P80, P20$ = Tamaños de partícula del producto al 80% y 20% pasante.

$F80, F20$ = Tamaños de partícula de la alimentación al 80% y 20% pasante.

2.1.13.1 Evaluación de la distribución de tamaño del producto final. La granulometría del producto final se ve afectada por varios factores, como el tipo de chancador utilizado, la configuración del equipo, la velocidad de alimentación y la dureza del mineral procesado. La estandarización de la granulometría permite minimizar el desgaste en los equipos de molienda, mejorar la eficiencia energética y reducir el tiempo de procesamiento en circuitos posteriores. En este sentido, el monitoreo y ajuste continuo de la granulometría del producto final es una estrategia fundamental para mejorar la productividad en la planta.

El análisis de la distribución de tamaños se realiza mediante el uso de tamices con diferentes aberturas y la construcción de curvas granulométricas acumulativas y diferenciales. La información obtenida se utiliza para evaluar la eficiencia del chancado en función de la fracción de partículas finas y gruesas generadas en el proceso. Un parámetro

crítico en este análisis es el P80, que representa el tamaño de partícula para el cual el 80% del material pasa a través de un tamiz específico. Este valor es utilizado como referencia para ajustar los parámetros operacionales del chancado y mejorar la eficiencia de molienda en circuitos posteriores.

Un control inadecuado de la granulometría del producto final puede generar impactos negativos en la molienda. Un exceso de partículas gruesas en la alimentación al molino SAG incrementa el tiempo de residencia en el equipo y eleva el consumo energético, afectando la capacidad operativa. En contraste, un material excesivamente fino puede reducir la eficiencia del molino, generando una baja productividad y aumentando el desgaste. Por esta razón, el control preciso de la distribución de tamaños en el chancado es un aspecto fundamental en la optimización del circuito de conminución.

2.1.13.2 Efecto de la variabilidad de alimentación en la curva granulométrica.

La variabilidad en la alimentación del chancado tiene un impacto significativo en la forma de la curva granulométrica del producto final. Factores como la heterogeneidad del mineral, la variación en la dureza y la presencia de diferentes tipos de roca pueden modificar la distribución de tamaño obtenida. Estas variaciones afectan la eficiencia del proceso, generando fluctuaciones en la estabilidad operativa y en el rendimiento de los equipos de chancado y molienda. En circuitos de procesamiento de minerales, la fluctuación en el tamaño de alimentación puede generar inestabilidad.

Uno de los efectos más notorios de la variabilidad de alimentación es la generación de carga circulante excesiva en el circuito de molienda. Cuando la alimentación contiene un alto porcentaje de partículas gruesas, se requiere un mayor consumo de energía para su reducción, lo que puede generar cuellos de botella en la etapa de molienda. Por otro lado, una alimentación con predominancia de partículas finas puede reducir la eficiencia del proceso, ya que estas partículas pueden ser evacuadas prematuramente del molino sin haber sido adecuadamente tratadas.

La estabilidad del sistema de molienda también se ve afectada por la variabilidad de la alimentación. Cambios en la granulometría de entrada pueden generar fluctuaciones

en la carga interna del molino, afectando la presión en los descansos del equipo y modificando el consumo energético. Para mitigar estos efectos, se han desarrollado estrategias de monitoreo en línea que permiten ajustar la alimentación en tiempo real, asegurando un perfil granulométrico estable y una operación eficiente del molino.

La implementación de sistemas de clasificación en la alimentación del molino SAG es una estrategia eficaz para minimizar los efectos de la variabilidad granulométrica. La utilización de harneros vibratorios y cribas de clasificación permite separar el material grueso antes de su ingreso al molino, optimizando la eficiencia del proceso y reduciendo la demanda energética. Estos sistemas han demostrado ser efectivos en la mejora de la productividad del circuito de conminución, asegurando una distribución de tamaño más homogénea y minimizando los costos operacionales (Támara, 2021).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Introducción al marco conceptual

La productividad del chancado está influenciada por múltiples factores, entre ellos la granulometría de alimentación, el diseño de los equipos, las condiciones operativas y la variabilidad mineralógica del material. Comprender estos elementos permite optimizar la operación y minimizar los costos asociados al consumo energético y al mantenimiento.

2.2.2 Definiciones claves

2.2.2.1 Chancado de minerales. Es la etapa inicial del procesamiento de minerales en la que se reduce el tamaño de los fragmentos de roca extraídos de la mina. Este proceso facilita el tratamiento posterior del material y mejora la recuperación de los metales valiosos.

2.2.2.2 Granulometría de alimentación. Hace referencia a la distribución del tamaño de las partículas que ingresan al chancador. Una alimentación homogénea y controlada.

2.2.2.3 Productividad del chancado. Se define como la capacidad de procesamiento del equipo en función del tiempo, la energía consumida y la calidad del producto obtenido tras la reducción de tamaño del mineral.

2.2.2.4 Modelos matemáticos del chancado. Herramientas analíticas utilizadas para predecir el comportamiento del mineral dentro de los chancadores, permitiendo optimizar la operación y reducir costos energéticos.

2.2.3 Factores que impactan la productividad del chancado

2.2.3.1 Tamaño de alimentación y su influencia en la productividad.

- Un tamaño de alimentación adecuado evita obstrucciones y mejora la eficiencia del chancado.
- Una distribución granulométrica descontrolada genera fluctuaciones en la carga del equipo, disminuyendo su eficiencia.

2.2.3.2 Consumo energético en el chancado

- Depende de su dureza y de las condiciones operativas del chancador.
- Los modelos de Bond y Rittinger ayudan a estimar el consumo energético necesario.

2.2.3.3 Desgaste de equipos y costos de mantenimiento

- Un control adecuado del tamaño de alimentación reduce el desgaste de los revestimientos del chancador.
- Ayuda a programar mantenimientos preventivos y reducir costos operativos.

2.2.4 Relación entre la granulometría y la eficiencia del chancado

- Una granulometría óptima mejora la eficiencia en la reducción de tamaño y minimiza la generación de material fino.
- Equipos de clasificación previos al chancado permiten controlar mejor la alimentación del chancador, optimizando su rendimiento.

2.2.5 Modelos matemáticos aplicados al chancado

2.2.5.1 Ley de Bond. Permite estimar la energía específica requerida para la reducción de tamaño de un mineral, facilitando la optimización del chancado.

2.2.5.2 Ley de Rittinger. Relaciona la superficie generada en el chancado con la energía aplicada, útil para estimar la eficiencia del proceso.

2.2.5.3 Simulación numérica del chancado.

- Los modelos matemáticos de simulación permiten predecir el comportamiento de los equipos bajo distintas condiciones operativas.
- El uso de herramientas computacionales ha mejorado la precisión de los cálculos en la optimización del chancado.

2.2.6 Impacto del tamaño de alimentación en el costo operacional

- Una alimentación controlada disminuye el consumo energético.
- Mejora la eficiencia y reduce costos de mantenimiento.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

Para evaluar la productividad del circuito de chancado, es fundamental considerar diversos factores y aplicar un procedimiento adecuado. Esto permitirá analizar cómo el tamaño de alimentación de los minerales sulfurados.

El estudio de una instalación de trituración se fundamenta en un exhaustivo muestreo llevado a cabo bajo condiciones operativas previamente definidas. Este proceso permite recopilar datos medibles y variables operacionales clave para establecer un balance detallado de materiales, identificando así parámetros fundamentales y constantes del circuito de chancado. Con esta información, es posible diagnosticar con precisión el desempeño real del circuito de chancado.

3.1 Procedimiento del circuito de chancado

Está compuesto por una tolva de gruesos, fajas transportadoras con electroimanes, una chancadora de quijadas de 4.5", zaranda vibratoria y una chancadora cónica de 2". El mineral se encuentra en una tolva de gruesos, luego es conducido por las fajas transportadoras con electroimanes N°1 hacia la chancadora de quijada de 4.5", donde se reduce su tamaño aproximadamente de 3" a 2", seguidamente el material triturado es transportado por la faja con electroimanes N°2 hasta la chancadora cónica, que realiza una nueva etapa de reducción a una granulometría aproximada de 2". Finalmente, la descarga es trasladada por la faja con electroimanes N°3 a la zaranda vibratoria de dos pisos con mallas de 2 ¼" y 2"; seguidamente el material de granulometría menor a 2" va hacia una tolva de finos para su proceso posterior, el material de granulometría menor de 2 ¼" a vuelve a la chancadora cónica.

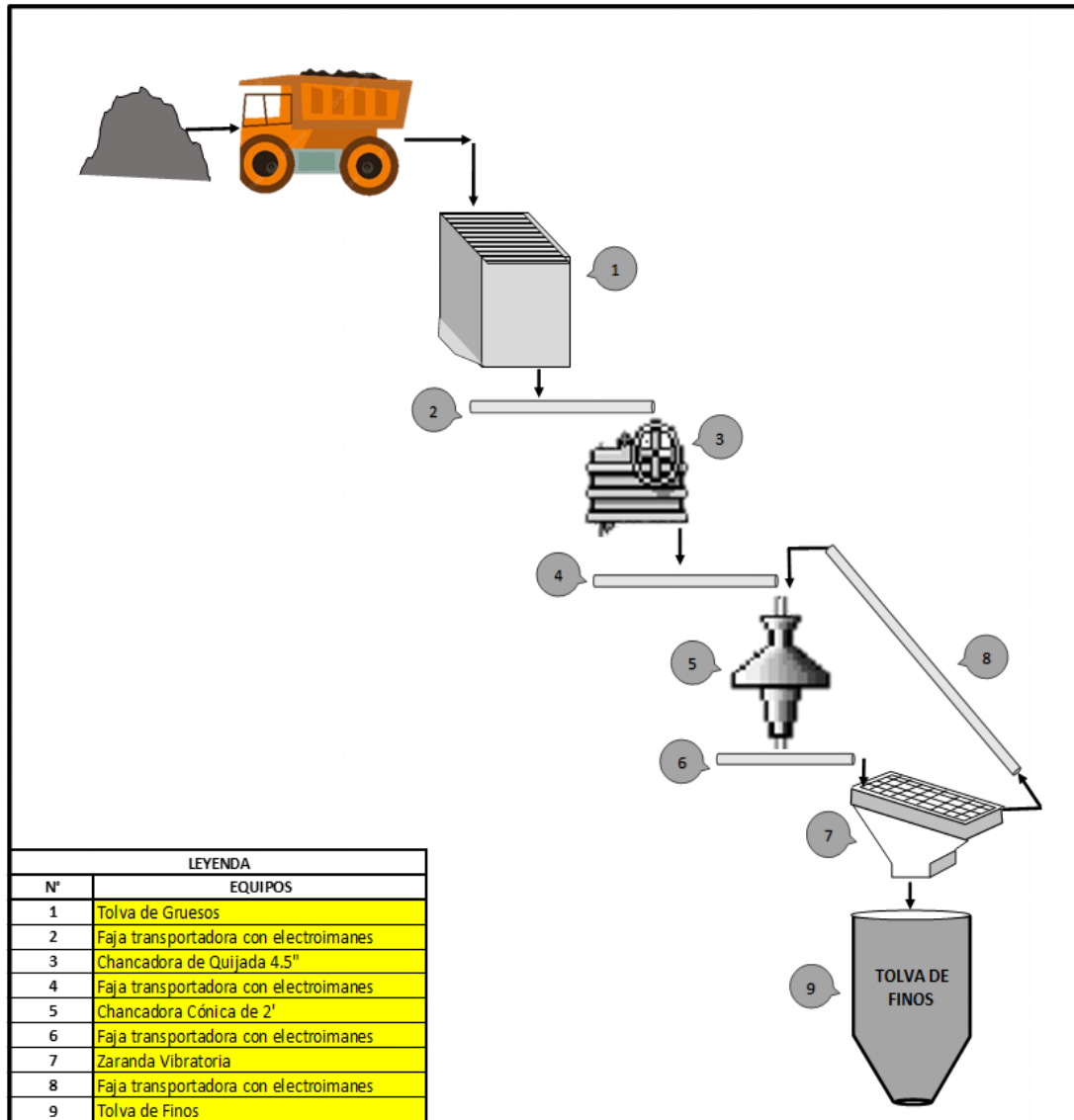
Puntos del muestreo del circuito de chancado:

- Alimentación a la Chancadora de Quijadas
- Descarga de la Chancadora de Quijadas
- Alimento a la Chancadora Cónica
- Descarga de la Chancadora Cónica

- Descarga de la Zaranda Vibratoria

Figura 18

Puntos de muestreo sección chancado



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Procedimiento de estimación de datos

Se utilizaron cálculos metalúrgicos convencionales, incluyendo los métodos de ajuste de datos de Rosin Rammler y Gaudin-Schuhmann.

3.3 Representación matemática del análisis granulométrico

Pueden representarse y correlacionarse mediante conocidas como “funciones de distribución de tamaños”, las cuales establecen la relación entre la abertura de malla y un peso, ya sea acumulado retenido o pasante.

Función de distribución de Gates-Gaudin-Schumann (G-G-S)

El modelo matemático propuesto es el siguiente:

$$F(x) = 100 \left(\frac{x}{k}\right)^m \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

$F(x)$ = % en peso acumulado pasante por cada malla.

x = Tamaño de partícula en micrones.

k = Módulo de tamaño el cual indica el tamaño teórico máximo de partículas en la muestra.

m = Módulo de distribución

Función de distribución de Rosin-Rammler (R-R)

Estos datos pueden ajustarse a una distribución de Rosin-Rammler si cumplen con la siguiente expresión:

$$F(x) = 100 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{k} \right)^m \right] \right\} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

$F(x)$ = Porcentaje acumulado pasante.

k = Es el módulo de tamaño

m = Es el módulo de distribución.

Potencia para conminación

$$P_{util} = \sqrt{3} * A * V * \cos \phi \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

P_{util} = Potencia para Conminución (kW)

V = Voltaje Usado (kV)

A = Amperios Consumidos (Amp)

$\cos \phi$ = Factor de Potencia (entre 0.8 a 0.9)

ϕ = Angulo de Fase entre Voltaje y Amperaje

$\sqrt{3}$ = Factor de Red Trifásica

Índice operacional

$$W_{util} = 10 * W_i * \left\{ \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

W_{util} = Energía para Conminución (kW – h/TC)

W_i = Índice de trabajo de Bond (kW – h/TC)

F_{80} = Tamaño 80% pasante de Alimentación (um)

P_{80} = Tamaño 80% pasante del Producto (um)

Determinación de humedades

$$\%humedad = \frac{\text{peso humedo} - \text{peso seco}}{\text{peso humedo}} * 100 \dots \dots \dots (5)$$

3.3 Evaluación del circuito de chancado

3.3.1 Análisis granulométrico del circuito de chancado

La Tabla 1, muestra el análisis granulométrico de la descarga de la chancadora de quijadas primaria.

Tabla 1

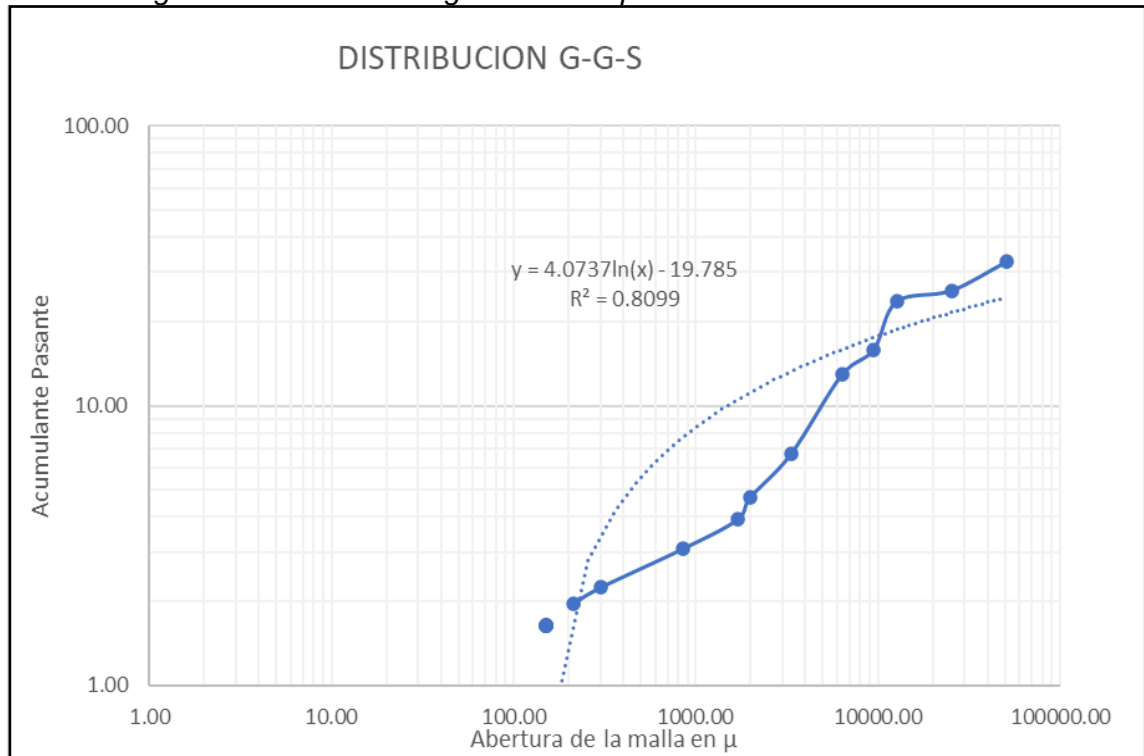
Distribución granulométrica descarga chancado primario

MALLA	ABERTURA u	PESOS	PESO PARCIAL	ACUMULADO RETENIDO	ACUMULADO PASANTE F(x)
2"	50800.00	673.30	67.33	67.33	32.67
1"	25400.00	68.35	6.83	74.17	25.84
1/2"	12700.00	22.29	2.23	76.39	23.61
3/8"	9525.00	77.06	7.71	84.10	15.9
1/4"	6350.00	30.10	3.01	87.11	12.89
m 6	3350.00	61.42	6.14	93.25	6.75
m10	2000.00	20.30	2.03	95.28	4.72
m12	1700.00	7.87	0.79	96.07	3.93
m20	850.00	8.42	0.84	96.91	3.09
m50	300.00	8.43	0.84	97.75	2.25
m70	212.00	2.87	0.29	98.04	1.96
m100	150.00	3.11	0.31	98.35	1.65
m140	106.00	16.48	1.65	100.00	0
m200	75.00	0	0.00	100.00	0
m270	53.00	0	0.00	100.00	0
m400	38.00	0	0.00	100.00	0
-m400	-38.00	0	0.00	100.00	0
		1000.00	100.00		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19

Distribución granulométrica descarga chancado primario



Fuente: Elaboración propia.

Las Tablas 2, 3 y 4 muestran el análisis granulométrico del alimento y descarga de la chancadora cónica, la descarga es pasada por una zaranda vibratoria por ello se tiene dos tablas con el análisis granulométrico, las series de tamices Tyler es la cual utilizaremos dado que las aberturas de la zaranda son 2 ¼" (57.15 mm) y 2" (50.8 mm), los tamices ASTM equivalentes serían:

- ASTM 2" (50.8 mm) → Malla N°4
- ASTM 2 ¼" (57.15 mm) → No tiene equivalente exacto en ASTM, se usa entre 2" y 2.5" de mayor 2 ¼" y la menor a 2".

Tabla 2

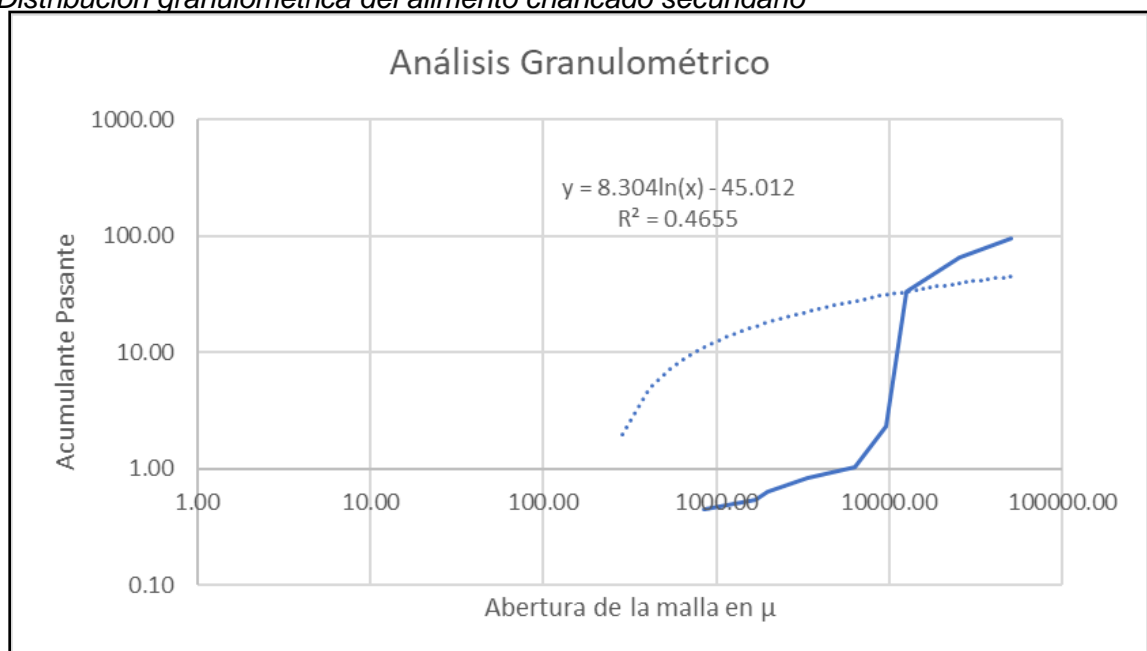
Distribución granulométrica del alimento chancado secundario

MALLA	ABERTURA u	PESOS	PESO PARCIAL	ACUMULADO RETENIDO	ACUMULADO PASANTE F(x)
2"	50800.00	41.20	4.12	4.12	95.88
1"	25400.00	305.44	30.54	34.66	65.34
1/2"	12700.00	315.88	31.59	66.25	33.75
3/8"	9525.00	314.24	31.42	97.68	2.32
1/4"	6350.00	13.03	1.30	98.98	1.02
m 6	3350.00	1.80	0.18	99.16	0.84
m10	2000.00	2.12	0.21	99.37	0.63
m12	1700.00	0.84	0.08	99.46	0.54
m20	850.00	0.97	0.10	99.55	0.45
m50	300.00	4.48	0.45	100.00	0.00
m70	212.00	0.00	0.00	100.00	0.00
m100	150.00	0.00	0.00	100.00	0.00
m140	106.00	0.00	0.00	100.00	0.00
m200	75.00	0	0.00	100.00	0.00
m270	53.00	0	0.00	100.00	0.00
m400	38.00	0	0.00	100.00	0.00
-m400	-38.00	0	0.00	100.00	0.00
		1000.00	100.00		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 20

Distribución granulométrica del alimento chancado secundario



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3

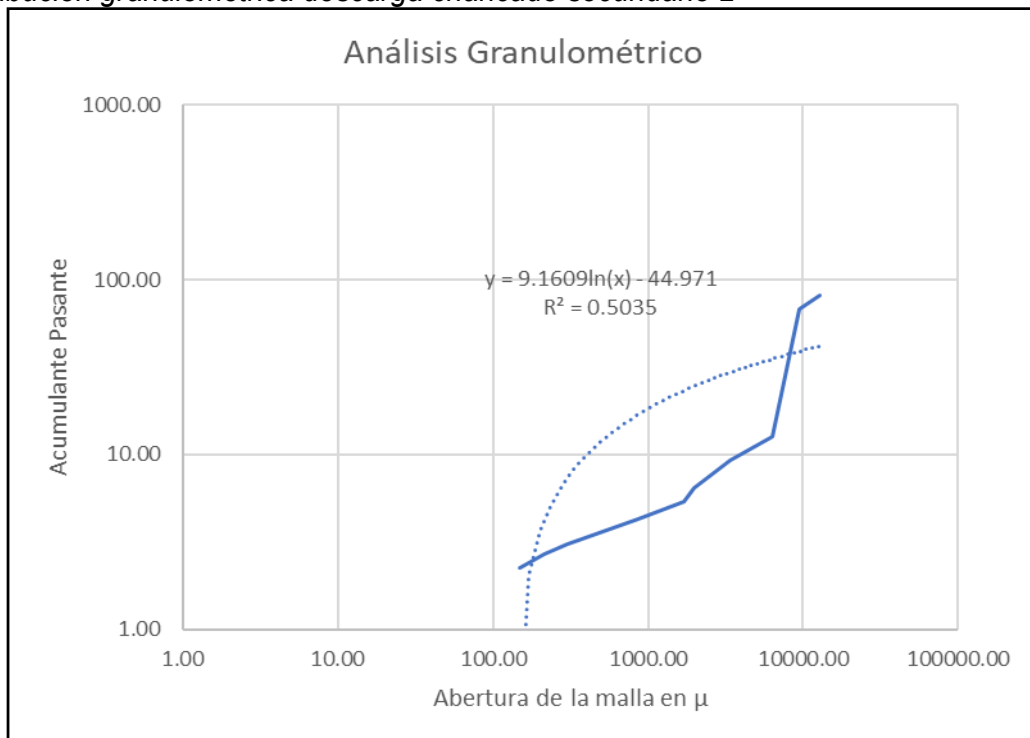
Distribución granulométrica descarga chancado secundario 2"

MALLA	ABERTURA u	PESOS	PESO PARCIAL	ACUMULADO RETENIDO	ACUMULADO PASANTE F(x)
1/2"	12700.00	191.68	19.17	19.17	80.83
3/8"	9525.00	133.93	13.39	32.56	67.44
1/4"	6350.00	548.49	54.85	87.41	12.59
m 6	3350.00	33.38	3.34	90.75	9.25
m10	2000.00	27.82	2.78	93.53	6.47
m12	1700.00	10.80	1.08	94.61	5.39
m20	850.00	11.55	1.16	95.77	4.24
m50	300.00	11.55	1.16	96.92	3.08
m70	212.00	3.93	0.39	97.31	2.69
m100	150.00	4.27	0.427	97.74	2.26
m140	106.00	22.60	2.260	100.00	0.00
m200	75.00	0	0.000	100.00	0.00
m270	53.00	0	0.000	100.00	0.00
m400	38.00	0	0.000	100.00	0.00
-m400	-38.00	0	0.000	100.00	0.00
		1000.00	100.00		

Fuente Elaboración propia.

Figura 21

Distribución granulométrica descarga chancado secundario 2"



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4

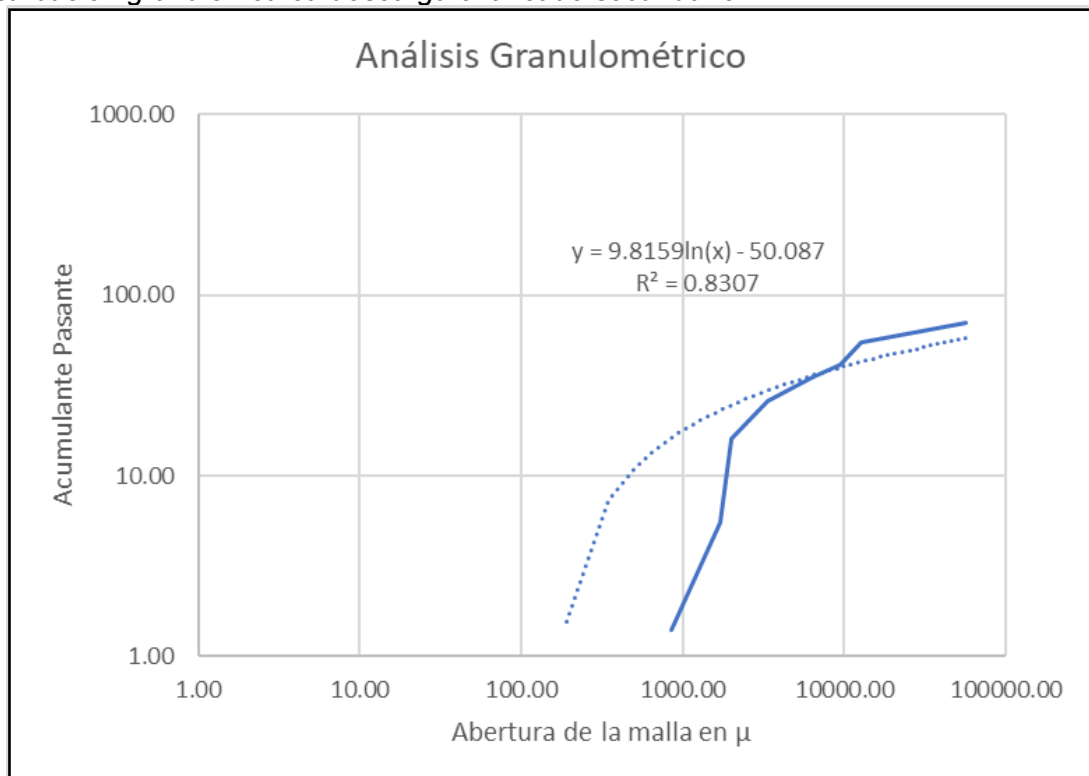
Distribución granulométrica descarga chancado secundario 2 1/4"

MALLA	ABERTURA u	PESOS	PESO PARCIAL	ACUMULADO RETENIDO	ACUMULADO PASANTE F(x)
2 1/4"	57150.00	295.40	29.54	29.54	70.46
1/2"	12700.00	161.00	16.10	45.64	54.36
3/8"	9525.00	129.00	12.90	58.54	41.46
1/4"	6350.00	62.90	6.29	64.83	35.17
m 6	3350.00	93.35	9.34	74.17	25.84
m10	2000.00	99.35	9.94	84.10	15.90
m12	1700.00	104.40	10.44	94.54	5.46
m20	850.00	40.50	4.05	98.59	1.41
m50	300.00	14.10	1.41	100.00	0.00
m70	212.00	0.00	0.00	100.00	0.00
m100	150.00	0.00	0.00	100.00	0.00
m140	106.00	0.00	0.00	100.00	0.00
m200	75.00	0	0.00	100.00	0.00
m270	53.00	0	0.00	100.00	0.00
m400	38.00	0	0.00	100.00	0.00
-m400	-38.00	0	0.00	100.00	0.00
		1000.000	100.000		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22

Distribución granulométrica descarga chancado secundario 2 1/4"



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Rectificación del análisis granulométrico con la función de distribución de Gates-Gaudin-Schumann (G-G-S) en la chancadora de quijada

La Tabla 5, que se presenta a continuación, muestra la rectificación de datos del análisis granulométrico de la descarga de la chancadora de quijada primaria con la función de distribución de Gates-Gaudin-Schuman.

Tabla 5

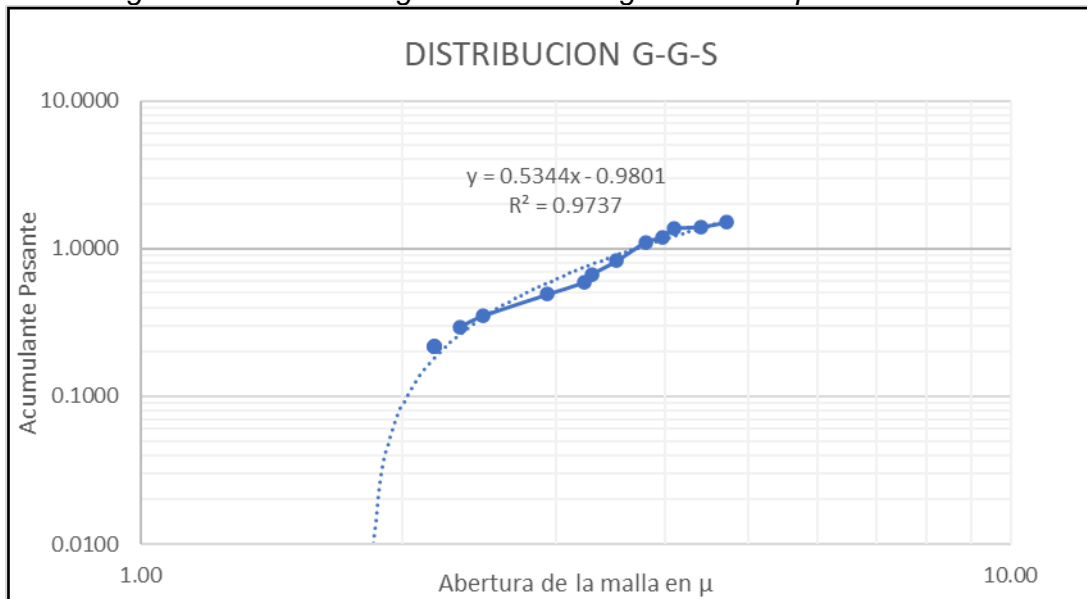
Distribución granulométrica corregida de la descarga chancado primario

						DISTRIBUCIÓN GGS				
MALLA	ABERTURA u	PESOS	PESO PARCIAL	ACUMULADO RETENIDO	ACUMULADO PASANTE F(x)	X=logx	Y=log F(x)	XY	X2	Y2
2"	50800.00	673.30	67.33	67.33	32.67	4.71	1.5141	7.1254	22.1452	2.2926
1"	25400.00	68.35	6.84	74.17	25.84	4.40	1.4122	6.2205	19.4026	1.9943
1/2"	12700.00	22.29	2.23	76.39	23.61	4.10	1.3730	5.6346	16.8412	1.8852
3/8"	9525.00	77.06	7.71	84.10	15.90	3.98	1.2014	4.7802	15.8314	1.4434
1/4"	6350.00	30.10	3.01	87.11	12.89	3.80	1.1103	4.2220	14.4611	1.2327
m 6	3350.00	61.42	6.14	93.25	6.75	3.53	0.8292	2.9229	12.4259	0.6875
m10	2000.00	20.30	2.03	95.28	4.72	3.30	0.6738	2.2241	10.8968	0.4539
m12	1700.00	7.87	0.79	96.07	3.93	3.23	0.5945	1.9205	10.4358	0.3534
m20	850.00	8.42	0.84	96.91	3.09	2.93	0.4898	1.4349	8.5815	0.2399
m50	300.00	8.43	0.84	97.75	2.25	2.48	0.3514	0.8705	6.1361	0.1235
m70	212.00	2.87	0.29	98.04	1.96	2.33	0.2920	0.6794	5.4118	0.0853
m100	150.00	3.11	0.31	98.35	1.65	2.18	0.2170	0.4721	4.7354	0.0471
m140	106.00	16.48	1.65	100.00	0.00	2.03	#¡NUM!	#¡NUM!	4.1019	#¡NUM!
m200	75.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.88	#¡NUM!	#¡NUM!	3.5159	#¡NUM!
m270	53.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.72	#¡NUM!	#¡NUM!	2.9731	#¡NUM!
m400	38.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.58	#¡NUM!	#¡NUM!	2.4957	#¡NUM!
-m400	-38.00	0.00	0.00	100.00	0.00					
		1000.000	100.000			48.17	10.06	38.51	160.39	10.84

Fuente: Elaboración propia.

Figura 23

Distribución granulométrica corregida de la descarga chancado primario



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5 contiene los datos corregidos mediante la Función de Distribución de Gates-Gaudin-Schuman, en donde se puede visualizar en la Figura 23, donde la línea de tendencia es la correcta con un error mínimo, inicialmente se tenía un error de 0.8099 pero al realizar el ajuste con (G-G-S) se tiene un error más pequeño de 0.9737, esto con la siguiente ecuación de correlación:

$$y = 0.5344x - 0.9801$$

Con esta ecuación se pueden rectificar los datos para una granulometría más uniforme.

4.2 Rectificación del análisis granulométrico con la función de distribución de Gates-Gaudin-Schumann (G-G-S) en la chancadora cónica

Las Tablas 6, 7 y 8; muestran la rectificación de datos del análisis granulométrico de la descarga de la chancadora de cónica secundaria con la función de distribución de Gates-Gaudin-Schuman.

Tabla 6

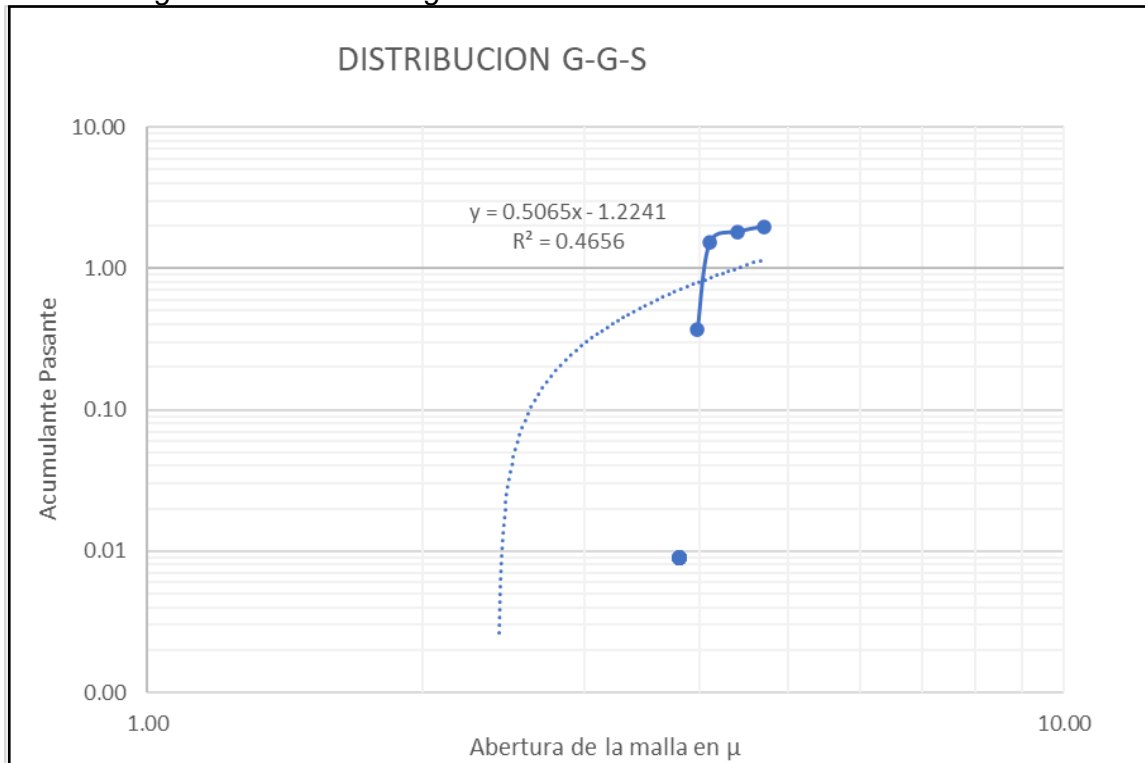
Distribución granulométrica corregida del alimento chancado secundario

						DISTRIBUCIÓN GGS				
MALLA	ABERTURA u	PESOS	PESO PARCIAL	ACUMULADO RETENIDO	ACUMULADO PASANTE F(x)	X=logx	Y=log F(x)	XY	X2	Y2
2"	50800.00	41.20	4.12	4.12	95.88	4.71	1.98	9.33	22.15	3.93
1"	25400.00	305.44	30.54	34.66	65.34	4.40	1.82	8.00	19.40	3.29
1/2"	12700.00	315.88	31.59	66.25	33.75	4.10	1.53	6.27	16.84	2.34
3/8"	9525.00	314.24	31.42	97.68	2.32	3.98	0.37	1.46	15.83	0.13
1/4"	6350.00	13.03	1.30	98.98	1.02	3.80	0.01	0.03	14.46	0.00
m 6	3350.00	1.80	0.18	99.16	0.84	3.53	-0.08	-0.27	12.43	0.01
m10	2000.00	2.12	0.21	99.37	0.63	3.30	-0.20	-0.66	10.90	0.04
m12	1700.00	0.84	0.08	99.46	0.54	3.23	-0.26	-0.85	10.44	0.07
m20	850.00	0.97	0.10	99.55	0.45	2.93	-0.35	-1.02	8.58	0.12
m50	300.00	4.48	0.45	100.00	0.00	2.48	#jNUM!	#jNUM!	6.14	#jNUM!
m70	212.00	0.00	0.00	100.00	0.00	2.33	#jNUM!	#jNUM!	5.41	#jNUM!
m100	150.00	0.00	0.00	100.00	0.00	2.18	#jNUM!	#jNUM!	4.74	#jNUM!
m140	106.00	0.00	0.00	100.00	0.00	2.03	#jNUM!	#jNUM!	4.10	#jNUM!
m200	75.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.88	#jNUM!	#jNUM!	3.52	#jNUM!
m270	53.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.72	#jNUM!	#jNUM!	2.97	#jNUM!
m400	38.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.58	#jNUM!	#jNUM!	2.50	#jNUM!
-m400	-38.00	0.00	0.00	100.00	0.00					
		1000.00	100.000			48.17	4.81	22.28	160.39	9.93

Fuente: Elaboración propia.

Figura 24

Distribución granulométrica corregida del alimento chancado secundario



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 6 contiene los datos corregidos mediante la Función de Distribución de Gates-Gaudin-Schuman, en donde se puede visualizar en la Figura 24, donde la línea de tendencia es la correcta con un error mínimo, inicialmente se tenía un error de 0.4655 pero al realizar el ajuste con (G-G-S) se tiene un error más pequeño de 0.4656, esto con la siguiente ecuación de correlación:

$$y = 0.5065x - 1.2241$$

Con esta ecuación se pueden rectificar los datos para una granulometría más uniforme, aunque el ajuste no hace una diferencia grande.

Tabla 7

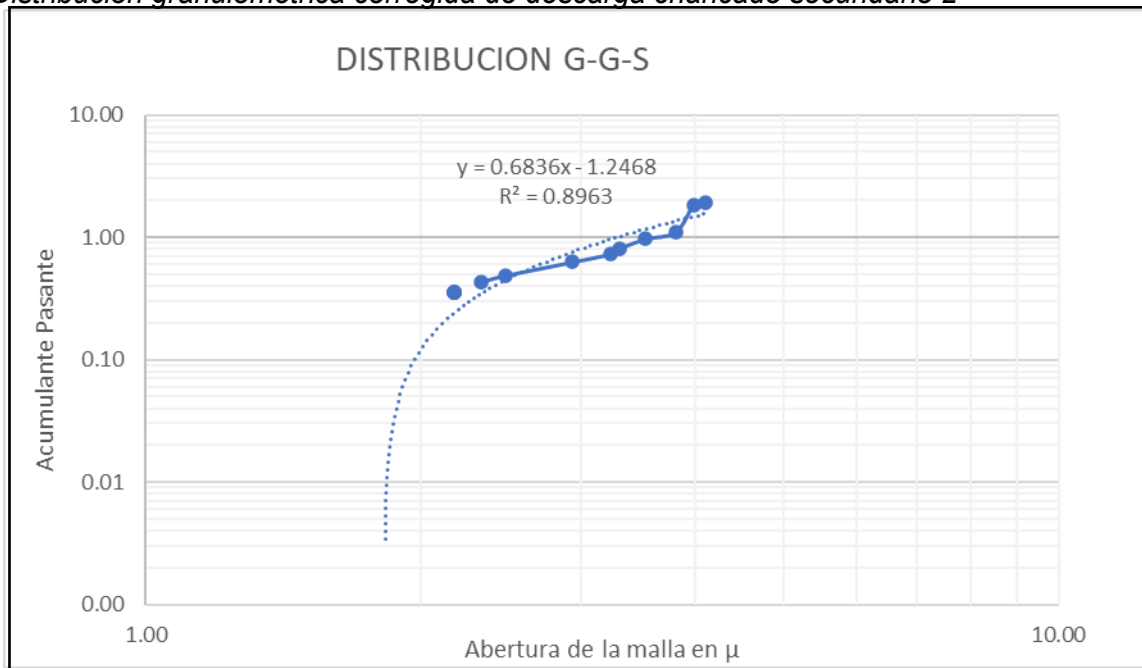
Distribución granulométrica corregida de descarga chancado secundario 2"

						DISTRIBUCIÓN GGS				
MALLA	ABERTURA u	PESOS	PESO PARCIAL	ACUMULADO RETENIDO	ACUMULADO PASANTE F(x)	X=logx	Y=log F(x)	XY	X2	Y2
1/2"	12700.00	191.68	19.17	19.17	80.83	4.10	1.91	7.83	16.84	3.64
3/8"	9525.00	133.93	13.39	32.56	67.44	3.98	1.83	7.28	15.83	3.34
1/4"	6350.00	548.49	54.85	87.41	12.59	3.80	1.10	4.18	14.46	1.21
m 6	3350.00	33.38	3.34	90.75	9.25	3.53	0.97	3.41	12.43	0.93
m10	2000.00	27.82	2.78	93.53	6.47	3.30	0.81	2.68	10.90	0.66
m12	1700.00	10.80	1.08	94.61	5.39	3.23	0.73	2.36	10.44	0.54
m20	850.00	11.55	1.16	95.77	4.24	2.93	0.63	1.84	8.58	0.39
m50	300.00	11.55	1.16	96.92	3.08	2.48	0.4886	1.2102	6.14	0.24
m70	212.00	3.93	0.39	97.31	2.69	2.33	0.4293	0.9986	5.41	0.18
m100	150.00	4.27	0.43	97.74	2.26	2.18	0.3541	0.7706	4.74	0.13
m140	106.00	22.60	2.26	100.00	0.00	2.03	#¡NUM!	#¡NUM!	4.10	#¡NUM!
m200	75.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.88	#¡NUM!	#¡NUM!	3.52	#¡NUM!
m270	53.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.72	#¡NUM!	#¡NUM!	2.97	#¡NUM!
m400	38.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.58	#¡NUM!	#¡NUM!	2.50	#¡NUM!
-m400	-38.00	0.00	0.00	100.00	0.00					
		1000.00	100.00			39.06	9.24	32.55	118.84	11.26

Fuente: Elaboración propia.

Figura 25

Distribución granulométrica corregida de descarga chancado secundario 2"



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 7 contiene los datos corregidos mediante la Función de Distribución de Gates-Gaudin-Schuman, en donde se puede visualizar en la Figura 25, donde la línea de tendencia es la correcta con un error mínimo, inicialmente se tenía un error de 0.5035 pero al realizar el ajuste con (G-G-S) se tiene un error de 0.8963, esto con la siguiente ecuación de correlación:

$$y = 0.6836x - 1.2468$$

Con esta ecuación se pueden rectificar los datos para una granulometría más uniforme.

Tabla 8

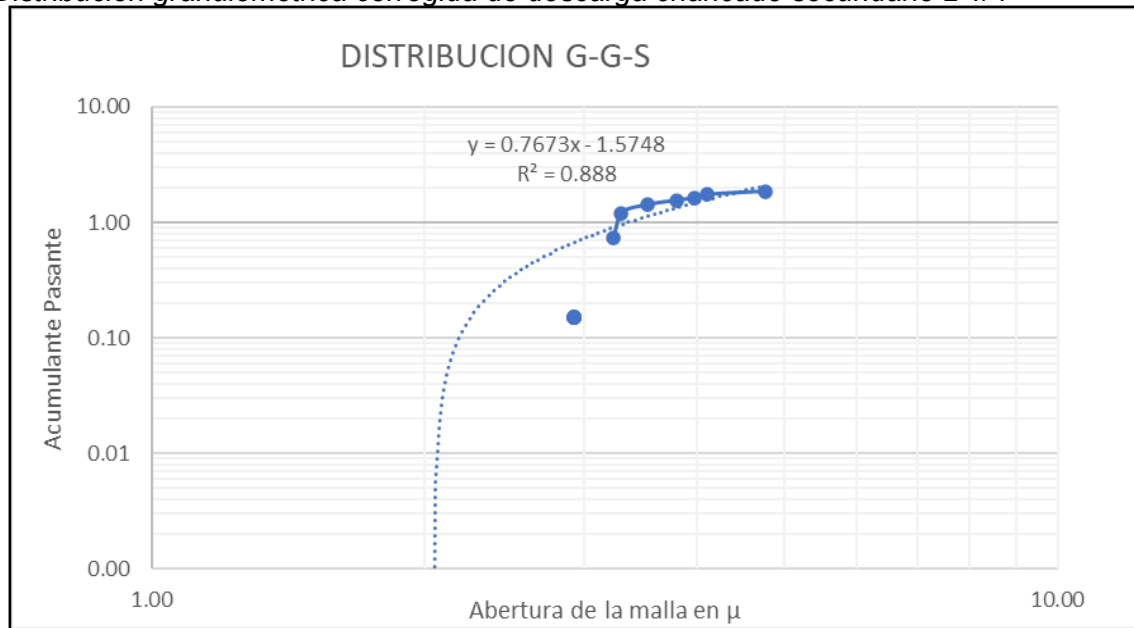
Distribución granulométrica corregida de descarga chancado secundario 2 1/4"

MALLA	ABERTURA u	PESOS	PESO PARCIAL	ACUMULADO RETENIDO	ACUMULADO PASANTE F(x)	DISTRIBUCIÓN GGS				
						X=logx	Y=log F(x)	XY	X2	Y2
2 1/4"	57150.00	295.40	29.54	29.54	70.46	4.76	1.85	8.79	22.63	3.41
1/2"	12700.00	161.00	16.10	45.64	54.36	4.10	1.74	7.12	16.84	3.01
3/8"	9525.00	129.00	12.90	58.54	41.46	3.98	1.62	6.44	15.83	2.62
1/4"	6350.00	62.90	6.29	64.83	35.17	3.80	1.55	5.88	14.46	2.39
m 6	3350.00	93.35	9.34	74.17	25.84	3.53	1.41	4.98	12.43	1.99
m10	2000.00	99.35	9.94	84.10	15.90	3.30	1.20	3.97	10.90	1.44
m12	1700.00	104.40	10.44	94.54	5.46	3.23	0.74	2.38	10.44	0.54
m20	850.00	40.50	4.05	98.59	1.41	2.93	0.15	0.44	8.58	0.02
m50	300.00	14.10	1.41	100.00	0.00	2.48	#¡NUM!	#¡NUM!	6.14	#¡NUM!
m70	212.00	0.00	0.00	100.00	0.00	2.33	#¡NUM!	#¡NUM!	5.41	#¡NUM!
m100	150.00	0.00	0.00	100.00	0.00	2.18	#¡NUM!	#¡NUM!	4.74	#¡NUM!
m140	106.00	0.00	0.00	100.00	0.00	2.03	#¡NUM!	#¡NUM!	4.10	#¡NUM!
m200	75.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.88	#¡NUM!	#¡NUM!	3.52	#¡NUM!
m270	53.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.72	#¡NUM!	#¡NUM!	2.97	#¡NUM!
m400	38.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.58	#¡NUM!	#¡NUM!	2.50	#¡NUM!
-m400	-38.00	0.00	0.00	100.00	0.00					
		1000.00	100.00			42.23	10.25	39.99	141.47	15.44

Fuente: Elaboración propia.

Figura 26

Distribución granulométrica corregida de descarga chancado secundario 2 1/4"



Fuente: Elaboración propia.

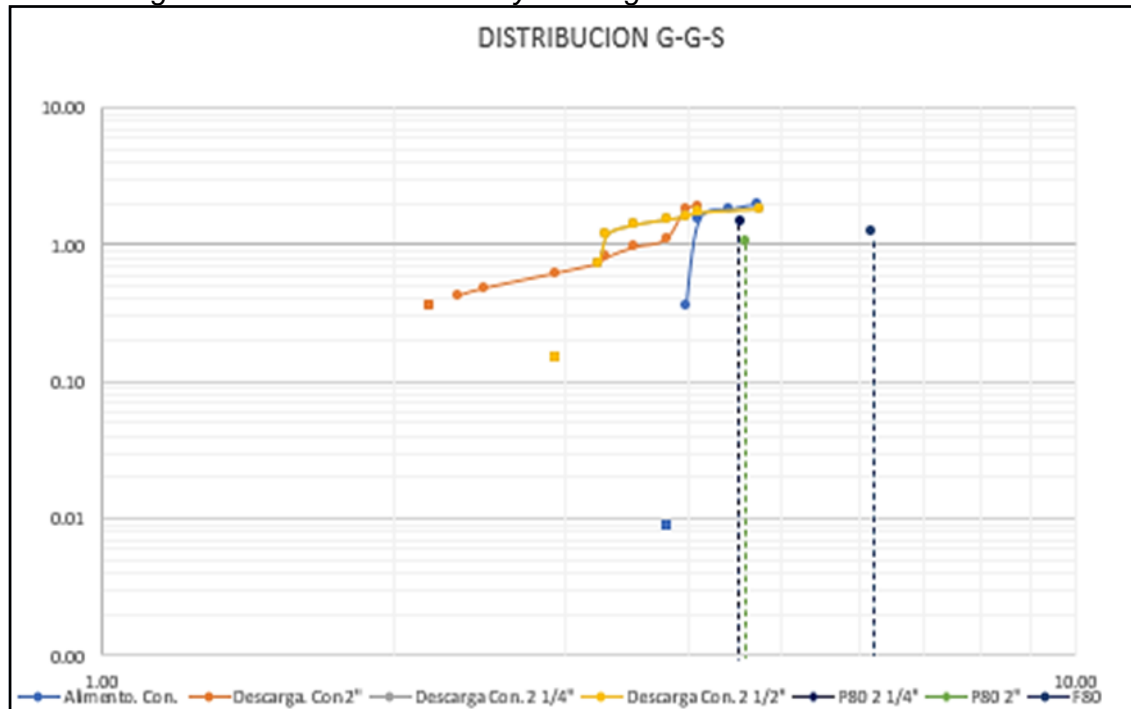
La Tabla 8 contiene los datos corregidos mediante la Función de Distribución de Gates-Gaudin-Schuman, en donde se puede visualizar en la Figura 26, donde la línea de tendencia es la correcta con un error mínimo, inicialmente se tenía un error de 0.8307 pero al realizar el ajuste con (G-G-S) se tiene un error de 0.888, esto con la siguiente ecuación de correlación:

$$y = 0.7673x - 1.5748$$

Con esta ecuación se pueden rectificar los datos para una granulometría más uniforme.

Figura 27

Distribución granulométrica de alimento y descarga de la chancadora cónica



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 27 muestra la tendencia de la corrección de datos del análisis granulométrico de la chancadora cónica de las Figuras 24,25 y 26 Podemos observar el rango en el que encontramos el $F_{80} = 1492702.72$ y el $P_{80} = 34090.66$; que aproximadamente están entre las mallas $3 \frac{1}{2}''$ y #6, lo cual sería el óptimo tamaño de la granulometría del mineral en el alimento y la descarga de la chancadora cónica.

Evaluación de costos

Ecuación de Bond:

$$W_{util} = 10 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \Rightarrow W_i = \frac{W_{util}}{10 \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$

Índice operacional y energía para conminución

$$\Delta = \left(\frac{1}{\sqrt{34,090.66}} - \frac{1}{\sqrt{1,492,702.72}} \right) \approx 0.0045976 \mu m^{-0.5}$$

$$\Rightarrow W_i = \frac{E}{10\Delta} \approx \frac{E}{0.0459756} \approx 21.75 E$$

Recordemos que:

$$E = \frac{P_{\text{útil}} \text{ (kW)}}{t/h} \Rightarrow \frac{E_{\text{nuevo}}}{E_{\text{base}}} = \frac{P_{\text{nuevo}}}{P_{\text{base}}} \times \frac{t/h_{\text{base}}}{t/h_{\text{nuevo}}}$$

Antes (base):

Corriente y tensión dan $P_{\text{útil}}=85$ kW

Tonelaje promedio ≈ 95 t/h

$$\Rightarrow E_{\text{base}} = 85/95 = \mathbf{0.895 \text{ kWh/t}} \approx 0.90 \text{ kWh/t}$$

Después (optimizado):

Misma chancadora, pero:

- Pre-cribado retira finos (- carga parásita) → bajó potencia media 85 → 82 kW
- Alimentación ahogada controlada (choke feed) + CSS afinado → sube capacidad 95 → 110 t/h

- $\Rightarrow E_{\text{nuevo}} = 82/110 = \mathbf{0.745 \text{ kWh/t}} \approx 0.75 \text{ kWh/t}$
- Componente potencia: $82/85 = 0.965$ --- -3.5%
- Componente capacidad $95/110 = 0.864$ ----- +15.8 % t/h
- Efecto combinado: $0.965 \times 0.864 = 0.833$ ----- -16.7 % en kWh/t

Nota: la clave no está mucho en bajar la potencia, sino el gran santo viene por aumentar t/h al estabilizar y limpiar la alimentación

- Por lo tanto pasamos de un 0.9 a 0.75 kWh/t

Análisis granulométrico comparativo antes vs después del pre-cribado

Tamaño (µm)	% Pasante ANTES	% Pasante DESPUÉS
50 800	5	6
25 400	11	13
12 700	22	25
9 525	32	36
6 350	45	50
3 350	59	66
2 000	71	79
1 000	82	88
500	90	94
250	95	97
150	97	99

Cuadro comparativo entre las gradientes y R²

Caso	Pendiente nn	Intercepto	R ²
ANTES	-0.90	-0.20	0.94
DESPUÉS	-0.98	-0.28	0.98

- En DESPUÉS la recta G-G-S explica mejor la variación de YYY (PSD linealizada), reflejando menor dispersión de la granulometría: curva más “recta” y estable.
- Eso es exactamente lo que esperas al retirar finos parásitos (pre-cribado) y fijar CSS al P80 objetivo: se reduce la curvatura de colas y el ruido en extremos → mejor R²

Ahorro directo en la etapa donde se bajó de 0.9 a 0.75 kWh/t

- Reducción específica = 0.15 kWh/t
- Ahorro diario (energía: 2000 t/d x 0.15 = 300kwh/d)
- Con tarifa de 0.15 USD/kWh: 45 USD/ día
- Ahorro anual 45x365 =16 425 USD/año

Este ahorro directo atribuible a estabilizar la PSD (pre-cribado+CSS) en la primera etapa

Un PSD más estable y menos fino parasitario reduce el consumo del molino de 12 %, Nuestra base de molienda era de 18 kWh/t

Ahorro específico fue 2.16 kWh/t

Ahorro diario fue 2000x2.16 = 4320 kWh/d

Ahorro diario (USD 0.15 USD/kWh)= USD 648 /día

Ahorro anual: USD 236 520 /año

Impacto en el índice de trabajo (Wi)

Antes Wi = 21.75x0.90= 19.6 kWh/t

Después: Wi=21.75x0.75= 16.3kWh/t

Efectos posteriores

La planta gasta USD 0.8/t en medios de molienda +liners

Con la mejora se reduzco el desgaste en 5-7 %

Calculo

$0.8 \text{ USD/t} \times 0.05-0.07 = 0.04-0.056 \text{ USD}$

Para las 2000 t/día

$2000 \times (0.04-0.056) = 80-112 \text{ USD/día}$

En 365 dias

$80-112 \times 365 = 29200-408800 \text{ USD/ año}$

Por lo tanto tenemos un ahorro anual de 30- 41 mil USD

Disponibilidad y throughput

- Estabilizó la cámara de chancado(choke feed) y mejora la clasificación, la molienda recibe materior más homogéneo
- Esto se traduce en +2-3 % de disponibilidad y capacidad efectiva
- Ampliación +2%--- 40 t/d extra

Teniendo el concentrado valorizado en 1500/t queremos decir que tendremos USD

60 000/ día en concentrado extra

Resumen global (2000 t/día)

- Ahorro energético directo: ~16 500 USD/año.
- Ahorro en molienda (8–12 %): ~105 000–158 000 USD/año.
- Menor desgaste bolas/liners: ~30 000–41 000 USD/año.
- Throughput adicional (2–3 %): beneficio potencial $\gg 100\ 000 \text{ USD/año}$
(dependiendo recuperación y ventas)

Conclusiones

Se verificó que el tamaño de alimentación incide significativamente en la eficiencia energética del chancado. El control del F80 y P80 permitió reducir el consumo específico de energía y minimizar el desgaste mecánico. La aplicación del modelo Gates-Gaudin-Schumann optimizó los parámetros operativos y redujo las cargas excesivas. Este enfoque técnico permitió mejorar la estabilidad y prolongar la vida útil de los equipos.

Influencia de la granulometría en la productividad

La investigación confirmó que la granulometría de alimentación incide directamente en la productividad del chancado de minerales sulfurados. Una alimentación uniforme y controlada no solo mejoró el rendimiento energético, sino que permitió aumentar en 2–3 % la capacidad efectiva de procesamiento, lo que en una planta de 2,000 t/d equivale a 40–60 t/d adicionales de mineral tratado.

Impacto en la eficiencia energética y costos

El control preciso del F80 = 1,492,702 μm y del P80 = 34,090 μm permitió reducir el consumo específico de energía en 0.15 kWh/t, lo que representa un ahorro de aproximadamente USD 100,000 por año en costos eléctricos para la planta. Este resultado demuestra que la optimización operativa puede tener efectos económicos significativos sin necesidad de grandes inversiones en infraestructura. Se considera que cuenta con una potencia contratada de aproximadamente 4.5 MW y se encuentra clasificada como cliente libre la planta,

Reducción del desgaste mecánico y costos de mantenimiento

El ajuste de parámetros y el pre-cribado no solo estabilizaron la cámara de chancado, sino que redujeron el desgaste de bolas y revestimientos en un rango de 5–7 %, equivalente a USD 30,000–40,000 de ahorro anual. Esto prolonga la vida útil de los equipos críticos, reduce paradas imprevistas y mejora la confiabilidad operativa.

Aporte de la instrumentación y la automatización

La instrumentación implementada, conformada por sensores de granulometría, caudal y potencia, integrada a PLCs y supervisada mediante SCADA, permitió un control automático y un monitoreo en tiempo real del circuito de chancado, lo que optimizó la operación al reducir el consumo energético, mejorar la disponibilidad de equipos y asegurar una gestión más eficiente y confiable del proceso. Contribución global a la sostenibilidad minera

Este estudio evidencia que controlar las variables de entrada desde el inicio del proceso es una estrategia técnica y económicamente viable. La reducción de energía, el menor desgaste mecánico y el incremento de la capacidad productiva constituyen un triple impacto positivo: económico, operativo y ambiental, aportando un modelo replicable en plantas polimetálicas modernas.

Recomendaciones

Implementar un control riguroso de la granulometría de alimentación mediante zarandas vibratorias y preclasificación. Esto optimiza la eficiencia energética, reduce el desgaste de equipos y mejora la capacidad de procesamiento del chancado.

Realizar calibraciones periódicas en las chancadoras aplicando modelos como Gates-Gaudin-Schumann. Así se mantendrá el F80 y P80 en rangos óptimos, reduciendo sobrecargas y prolongando la vida útil de los componentes..

Incorporar sensores en línea y sistemas de monitoreo en tiempo real para ajustar dinámicamente la operación. Esto mejorará la estabilidad operativa, minimizará interrupciones y aumentará la eficiencia global del circuito.

Controlar el tamaño de alimentación para reducir la generación de finos en el chancado. Esta medida mejora la recuperación metalúrgica, evita pérdidas en flotación y optimiza la calidad del concentrado final.

Referencias bibliográficas

- Bascuñán, J. (2023). *Mapa de procesos de chancado: hallazgos y oportunidades de mejora para estabilizar niveles de stockpile utilizando metodología dmaic en división los bronce angloamerican sur S.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
<https://repositorio.usm.cl/server/api/core/bitstreams/2d161262-6079-4acf-800e-8761169bf2f9/content>
- Benavente García, D. (2020). *Sulfuros y sulfosales. Minerales de Visu - UA.*
<https://web.ua.es/es/lpa/minerales-visu/clasificacion-y-caracteristicas/ii.-sulfuros-y-sulfosales/sulfuros-y-sulfosales.html>
- Br. Alcalde Ruiz, J. L. (2019). • *Emulsión gasificada en reemplazo de heavy anfo para reducir el P80 en la fragmentación e incrementar la productividad en carguío, acarreo y chancado en mina Shougang Hierro Perú.* Universidad Nacional de Trujillo.
- Caballero, A. (2017). *Relación entre desgaste de mantos y parámetros críticos de funcionamiento del chancador primario tipo NT de la minera Chinalco Perú.*
- Chávez, E. (2019). *Instalación de chancadora short head para mejorar el análisis granulométrico del producto del chancado en Sociedad Minera el Brocal S.A.A., Pasco-2019.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio UNDAC.
http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1889/1/T026_44895131_T.pdf
- Chancador primario giratorio MKIII. (s/f). *Metso. Recuperado el 19 de septiembre de 2023,* de <https://www.metso.com/es/portafolio/chancador-primario-giratorio-mkiii/>
- Chancadores. (s/f). *Metso. Recuperado el 18 de septiembre de 2023,* de <https://www.metso.com/es/agregados/productos/chancadores/>

- Chancadores de cono. (s/f). Metso. Recuperado el 19 de septiembre de 2023, de <https://www.metso.com/es/agregados/productos/chancadores/chancadores-decono/>
- Chancadores de impacto. (s/f). Metso. Recuperado el 18 de septiembre de 2023, de <https://www.metso.com/es/agregados/productos/chancadores/chancadores-de-impacto/>
- CHANCADORES DE IMPACTO BARMAC® SERIE BTM. (s/f). Metso. Recuperado el 19 de septiembre de 2023, de <https://www.metso.com/es/portafolio/chancadores-de-impacto-barmac-serie-b/>
- Chancadores móviles. (s/f). Metso. Recuperado el 19 de septiembre de 2023, de <https://www.metso.com/es/agregados/productos/chancadores/chancadores-moviles/>
- Chancadores portátiles. (s/f). Metso. Recuperado el 19 de septiembre de 2023, de <https://www.metso.com/es/agregados/productos/chancadores/chancadores-portatiles/>
- Codelco. (2018). Chancado «*Reduciendo la roca*». Codelcoeduca.cl. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004934/chancado_media_tecnico_060119.pdf
- Cristobal, W., y Huatuco, J. (2012). *Determinación del work index según la teoría de e. Bond mediante pruebas de moliendabilidad de sulfuros para el control de la etapa de molienda a nivel de laboratorio en la facultad de ingeniería química – U.N.C.P.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3701/Cristobal%20Lara-Huatuco%20Cuestas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Díaz, R. P. (2010). *Automatización con plc y scada del proceso de chancado en la minera aurífera retamas s.a.* Universidad Nacional del Centro de Perú
- Galarza, Y. F. G. (2022). *Mejora de procesos para incrementar la productividad en una empresa minera.* Universidad Peruana los Andes.

- Herrera Asto, C. A. (2019). *Implementación de un plan de mantenimiento preventivo para optimizar el circuito de chancado en la Compañía Minera Chungar-Unidad Alpamarca*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Hinojosa, J. J. F. (2023). *Diseño de una planta de chancado para reducir el costo de capital (CAPEX) de un proyecto minero en la etapa de factibilidad*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1982). *Introduction to Mineral Processing*. Wiley. Recuperado el 24 de noviembre del 2024 de https://miningstudents.files.wordpress.com/2016/12/mineral_processing_design_and_operation.pdf
- León Gonzales, D. M., Universidad Cesar Vallejo, Medina Paredes, M., Méndez Parodi, R., Universidad Cesar Vallejo, & Universidad Cesar Vallejo. (2020). *Aplicación de la mejora continua para incrementar la productividad de la empresa J.C. Astilleros-División Minera*. *INGnosis Revista de Investigación Científica*, 6(2). <https://doi.org/10.18050/ingnosis.v6i2.2080>
- León, H. A. C. (2020). *PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA INCREMENTAR LA PRODUCTIVIDAD DE LOS EQUIPOS DE CHANCADO SECUNDARIO EN UNA EMPRESA MINERA*. Universidad Peruana los Andes.
- Manquillo. (2007). *Granulometric distribution of bed material in rivers with image processing*. *I+ T+ C- Research, Technology and Science*, 1(1). Retrieved from <https://revistas.unicomfacauca.edu.co/ojs/index.php/itc/article/view/21>
- METSO. (2024). *HRCTM Rodillos de molienda de alta presión (HPGR)*. <https://www.metso.com/es/portafolio/hrc-rodillos-de-molienda-de-alta-presion-hpgr/>
- Nordberg® Serie CTM. (s/f). *Metso*. Recuperado el 19 de septiembre de 2023, de <https://www.metso.com/es/portafolio/chancador-de-mandibula-serie-c-nordberg/>

- Mayta, A. (2023). *La aproximación polinómica aplicada en la corrección de datos de granulometría en un circuito de molienda clasificación de minerales*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio UNSA.
<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f9b1bdf1-ab89-46cf-ab05-d64beef68d30/content>
- Paucar, E. (2021). “*Cinética de flotación de minerales sulfurados para obtención del concentrado de cobre y zinc en planta concentradora de empresa los quenuales S.A. unidad minera Contonga – San Marcos 2021*”. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional “José Faustino Sánchez Carrión”]. Repositorio UNJFSC.
https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/6010/paucar_compressed.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Refulio, J., y Rodríguez, M. (2009). *Evaluación del chancado, molienda y flotación para la ampliación de planta de 3 600 a 4 200 tmsd en la unidad minera y auliy acu - empresa minera los Quenuales S. A.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP.
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/237/T-09_5.pdf;jsessionid=0EEDE8EFDD3D92CCEA26E754BDBE4A9C?sequence=1
- Ortega, O., & Páez, O. (1989). *Vista de Composición geoquímica y mineralógica de los depósitos hidrotermales de la dorsal del pacífico mexicano (21°N) y la cuenca de Guaymas* [Universidad Nacional Autónoma de México].
<https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1989.28.4.1320>
- Osorio, Ruiz, Pérez, & Alvarado. (2014). *Modelamiento matemático aplicado a conminución*.
- Puma, J. P. A. (2021). *EVALUACIÓN DE MINERALES POLIMETÁLICOS DE WOLFRAMITA Y MOLIBDENITA PARA SU ADAPTACIÓN DE BENEFICIO METALÚRGICO*. Universidad Nacional de San Agustín.
- Ramos, C. (2019). *Mejoramiento de la eficiencia de chancadora*.

- Rodriguez, M. (2015). *OPTIMIZACIÓN Y MEJORA EN LA ETAPA DE CHANCADO/AGLOMERADO/LIXVIACIÓN EN MINERA ANITA LTDA*. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso]. Repositorio PUCV.
http://opac.pucv.cl/pucv_txt/Txt-5500/UCD5746_01.pdf
- Quinta, Y. E. A. (2018). *EVALUACION DEL CIRCUITO DE CONMINUCION Y FLOTACIÓN DE LA PLANTA CONCENTRADORA DE LA EMPRESA MINERA MINSUR S.A.* Universidad Nacional de San Agustín.
- Salazar, R. (2019). *ANÁLISIS ECONÓMICO DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MUROS DE SUELO REFORZADO COMO BASE DE INSTALACIÓN DE UNA CHANCADORA PRIMARIA SEMI – MÓVIL*. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP
https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/14391/SALAZAR_IZQUIERDO_RUBEN_LOUREDES_ANALISIS_ECONOMICO_MUROS.pdf?sequence=1
- Silva. (2013). *Variables operacionales y su influencia en la operación, pro optimización del consumo energético en la molienda SAG*.
- Solar, F. A. L. (2016). *DIAGNÓSTICO PRODUCTIVO EN LAS OPERACIONES UNITARIAS DE TRANSPORTE Y PLANTA DE CHANCADO DE MINERA ANTUCOYA MEDIANTE SIMULACIÓN DINÁMICA DE EVENTOS DISCRETOS*. Universidad de Chile.
- Song, S., Li, S., Zhang, T., Pan, H., Liu, N., & Zhang, L. (2022). *Study on the distribution pattern of particle re-crushing in the coal and rock mass crushing process under pressure*. *PloS One*, 17(1), e0262235.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262235>
- Nassar, A. M., Araujo, A. C., & Oliveira, C. A. (2021). *Mineralogical variability and its impact on processing performance in polymetallic ore deposits*. *Minerals Engineering*, 170, 107074.

- Támara, E. (2021). *OPTIMIZACION DEL CIRCUITO DE CHANCADO EN LA PLANTA DE BENEFICIO EL INKA*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional “José Faustino Sánchez Carrión”]. Repositorio UNJFSC.
<https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/5579/T%C3%81MARA%20HUANSHA%2C%20ELIO%20NEMIAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ticona, M. (2024). *Incremento de la productividad parcial del trabajo evaluando la configuración de aberturas de la superficie de cribado de una zaranda vibratoria de clasificación húmeda instalada en una planta industrial de concentración de minerales*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Continental.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15067/8/IV_FIN_108_TE_Ticona_Checa_2024.pdf
- Tocto, C. A. P. (2023). *Aplicación de la tecnología HPGR al circuito de chancado para aumentar el tonelaje en molienda*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Toledo, N. I. V. (2021). *Metodología de análisis de criticidad de activos aplicado en planta de procesos para optimizar la productividad en minera Paicavi*. Universidad de Talca.
- Valenzuela, A., Álvarez, J., & Rodríguez, M. (2010). *Procesamiento de Minerales: Fundamentos y Aplicaciones*. Ediciones Técnicas Mineras.
- Vásquez, F. A. C. (2019). *DESARROLLO DE UNA ESTRATEGÍA DE CONFIABILIDAD EN PLANTA CHANCADO DIVISIÓN GABRIELA MISTRAL*. Universidad de Chile.
- Vásquez Torres, A. (2022). *OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE CHANCADO DE LA PLANTA DE AGREGADOS FUNDO ALTO DEL RÍO, AREQUIPA 2020*. Universidad Nacional de San Agustín.
- Vettorelo, P. (2010). *Curva granulométrica de la arena ensayada*.
https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Curva-granulometrica-de-la-arena-ensayada_fig1_273763156.

Wills, B. A., & Finch, J. H. (2015). *Wills' Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8.a ed.). Butterworth-Heinemann.

Yévenes, M. B. M. (2021). *Metodología para la medición y análisis de la productividad en operaciones mineras: productividad total de factores*. Universidad de Chile.

Zaror, J. E. D. (2018). *Productividad en la gran minería del cobre en Chile: del diagnóstico a los planes de acción*. Universidad de Chile.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Matriz de consistencia.	1

Anexo 1: Matriz de consistencia.

Análisis de la productividad del proceso de chancado en función del tamaño de alimentación en minerales sulfurados

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES
¿Cómo influye el tamaño de la alimentación en la productividad del proceso de chancado de minerales sulfurados?	Analizar la influencia del tamaño de la alimentación en la productividad del proceso de chancado de minerales sulfurados..	Una adecuada granulometría de alimentación mejora significativamente la productividad del chancado de minerales sulfurados.	V. Independiente Tamaño de alimentación de mineral sulfurado. V. Dependiente Productividad del proceso de chancado	
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPÓTESIS ESPECIFICAS	VARIABLES	
¿Cuál es la relación entre la granulometría de la alimentación y la eficiencia energética del proceso de chancado?	Analizar la correlación entre la granulometría de la alimentación y el consumo energético específico.	Existe una correlación inversa entre el tamaño de alimentación y el consumo energético específico del chancado.	Consumo energético	Relación F80/P80 Índice de Bond (Wi)
¿Qué condiciones de alimentación optimizan la capacidad de procesamiento?	Identificar las condiciones de alimentación que maximizan la capacidad de procesamiento.	Condiciones óptimas de alimentación incrementan la capacidad operativa del equipo.	Condiciones de alimentación	Análisis granulométrico
¿Cómo afecta la granulometría de alimentación a la generación de finos y la calidad del producto final?	Evaluar el efecto del tamaño de alimentación sobre la generación de finos y la calidad granulométrica del producto.	Un control adecuado de la granulometría reduce la generación de finos y mejora la calidad granulométrica del producto final.	Calidad granulométrica	% de finos generados