

Diseño de un molino de bolas con la finalidad de realizar pruebas de molienda del material mineralizado proveniente de la región sur del Ecuador

Designing a ball mill with the purpose of conducting grinding tests on the mineralized material from the southern region of Ecuador

Hernan Luis Castillo García^{1,*}, Stive Cajas¹, Julio Romero Sigcho¹ y Oscar Estrella Lima¹

¹ Carrera de Ingeniería en Minas, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

* Autor para correspondencia: hernancastil@yahoo.es

Fecha de recepción del manuscrito: 29/04/2024 Fecha de aceptación del manuscrito: 15/04/2024 Fecha de publicación: 30/06/2024

Resumen—Los objetivos del proyecto comprenden la definición de variables y parámetros pertinentes, la construcción del molino conforme a estos criterios y la validación de su funcionamiento mediante pruebas con muestras reales. Para la validación del equipo, se llevaron a cabo pruebas en el laboratorio de la Universidad Nacional de Loja, utilizando tres muestras provenientes de distintas localidades (Chinapinza, Torata, Santa Isabel), que fueron caracterizadas y se delimitaron sus propiedades índices. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a trituración con un tamaño de partícula final (P80) de 3328 micras para realizar pruebas de molienda. En el inicio del proceso de molienda, se pesó el material y se introdujo en el molino de bolas junto con un gradiente determinado y un porcentaje de agua específico (relación 1 material / 1 agua). Se establecieron diferentes tiempos de molienda para realizar el análisis de distribución de tamaños mediante el método de Rosin-Rammler, que proporcionó una información donde el P80 era 80 % de material molido pasante. Además, se llevó a cabo un ensayo de medición de ruido, que reveló que el equipo debe ubicarse en un cuarto cerrado o en un lugar aislado debido a la contaminación acústica que genera, y se recomienda el uso de tapones para los oídos y una mascarilla como Equipo de Protección Personal (EPP). Los resultados obtenidos muestran que el molino logra una eficiencia de molienda satisfactoria en un tiempo de 2 horas. Sin embargo, para mejorar aún más el proceso de molienda y garantizar la calidad de los resultados, se sugiere implementar un gradiente de tamaño de bolas más amplio y establecer procedimientos rigurosos de control de calidad. Estas medidas contribuirán a mejorar la durabilidad, eficacia y consistencia del proceso de molienda, lo que impactará positivamente en el laboratorio de la universidad y en el desarrollo económico y profesional en el área minera.

Palabras clave—Diseño de molino de bolas, Molienda, Material mineralizado, Región sur del Ecuador, Validación del modelo, Medición de ruido, Eficiencia de molienda.

Abstract—The project objectives include defining relevant variables and parameters, constructing the mill according to these criteria, and validating its operation through tests with real samples. For equipment validation, tests were carried out in the UNL university laboratory using three samples from different locations (Chinapinza, Torata, Santa Isabel), which were characterized, and their index properties were delimited. Subsequently, the samples were subjected to crushing with a final particle size (P₈₀) of 3328 microns for grinding tests. At the beginning of the grinding process, the material was weighed and introduced into the ball mill along with a determined gradient and a specific percentage of water (1 material / 1 water ratio). Different grinding times were established to perform the size distribution analysis using the Rosin-Rammler method, which provided information where P₈₀ was 80 % of the passing ground material. Additionally, a noise measurement test was conducted, revealing that the equipment should be located in a closed room or an isolated place due to the acoustic pollution it generates, and the use of earplugs and a mask as Personal Protective Equipment (PPE) is recommended. The results obtained show that the mill achieves satisfactory grinding efficiency in a time of 2 hours. However, to further improve the grinding process and ensure the quality of the results, it is suggested to implement a wider ball size gradient and establish rigorous quality control procedures. These measures will contribute to improving the durability, efficiency, and consistency of the grinding process, positively impacting the university laboratory and the economic and professional development in the mining area.

Keywords—Ball mill design, Grinding, Mineralized material, Southern region of Ecuador, Model validation, Noise measurement, Grinding efficiency.

INTRODUCCIÓN

La industria minera depende en gran medida de la eficacia y precisión de los procesos de conminución y

molienda de minerales, fundamentales para la extracción y procesamiento de minerales valiosos, contribuyendo significativamente al desarrollo económico y social de la región.

Sin embargo, la diversidad de materiales mineralizados en esta área geográfica plantea desafíos únicos en el diseño y operación de equipos.

Reconociendo la conminución como un proceso esencial en la minería, que implica la reducción del tamaño de partículas a través de trituración y/o molienda, este estudio aborda la necesidad de un molino de bolas adaptado a las características específicas del laboratorio para probar materiales mineralizados del sur de Ecuador. El objetivo es desarrollar un diseño de molino de bolas considerando variables, parámetros y condiciones inherentes a los materiales de la región. Esto requiere diversas etapas de investigación y desarrollo, cada una abordando aspectos específicos de diseño, construcción, pruebas y validación.

El presente artículo presentará la identificación y análisis de las condiciones de operación requeridas para la molienda eficiente, ya que servirán como base para definir las variables, parámetros y características que influirán en el diseño y en la construcción del molino de bolas. Además, realizaremos un análisis de las pruebas piloto con muestras representativas. Como última etapa, con toda la información recopilada en el laboratorio en base a las pruebas realizadas aseguramos la validación del equipo ya que cumple con altos estándares de calidad y eficiencia en el laboratorio.

Los objetivos que permitirán el diseño, construcción y validación del molino de bolas para realizar pruebas de molienda del material mineralizado se describen a continuación: **Objetivo General:** Elaborar el diseño del molino de bolas sobre la base de las variables, parámetros y condiciones inherentes a los materiales mineralizados de la región sur del país. **Objetivos Específicos:** Definir las variables, parámetros y características que influyen en la construcción del diseño del molino de bolas en el laboratorio de la carrera de minas, construir el molino de bolas a partir de las variables y parámetros deseados y validación del modelo tomando como base los materiales mineralizados de la región sur del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el propósito de diseñar el molino de bolas para realizar pruebas de molienda del material mineralizado proveniente de la región sur del Ecuador, este proyecto plantea tres objetivos específicos. Estos objetivos, mediante las acciones de trabajo detalladas a continuación, han permitido determinar las variables, parámetros y características necesarios para su diseño, construcción y validación, siguiendo el criterio técnico-minero. Se empleó un enfoque metodológico descriptivo y cuantitativo, que abarcó diversas etapas, incluyendo trabajo de campo, laboratorio y análisis de datos en la oficina. Estas actividades sistemáticas se ejecutaron conforme al avance del proyecto, culminando con éxito en el logro de los objetivos planteados.

Recolección de información, variables y características

En la fase inicial, se llevó a cabo una exhaustiva búsqueda y selección de fuentes especializadas relacionadas con molinos en general y molinos de compartimientos múltiples. Se recopilaron artículos científicos, libros y publicaciones técnicas relevantes que aborden aspectos específicos de cada tipo

de molino antes mencionado, con el objetivo de obtener una base sólida de conocimiento para el diseño del equipo.

La revisión bibliográfica ayudó también a seleccionar fuentes especializadas que contengan ecuaciones y modelos matemáticos relacionados con los molinos antes mencionados y ciertas funciones mecánicas. Mediante el análisis de estas ecuaciones y modelos, se determinaron variables y parámetros claves que influyen en el rendimiento y diseño del molino de bolas.

Esta etapa es fundamental, ya que la identificación de variables y parámetros clave para comprender las características únicas de cada tipo de molino que influyen en el diseño y construcción del molino de bolas son:

- Relaciones geométricas
- La velocidad de rotación del molino
- Tipo y tamaño de material a moler
- Sistema de accionamiento
- Sistema de carga y descarga.

Determinación de las variables y parámetros claves

La evaluación permitió determinar las variables y parámetros clave que influyen significativamente en el rendimiento y diseño de los molinos, tales como la velocidad de rotación (N), el diámetro del tambor (Dm) y la carga de bolas (Cb).

Además, se consideraron parámetros relacionados con la eficiencia de molienda, la capacidad de carga, el consumo de energía y la durabilidad del molino. Para lo cual, en la identificación de variables y parámetros para el diseño tenemos:

- Variables: Diámetro del molino (D), longitud del molino (L), carga de bolas (C), tamaño máximo de alimentación (d_{max}), transmisión óptima, entre otros.
- Variables físicas: Velocidad de rotación (N), diámetro del tambor (Dm), carga de bolas (Cb), eficiencia de molienda (E_m), y potencia requerida para la operación (P_{requerida}).
- Parámetros: Potencia requerida (P), capacidad de molienda (Q), tamaño de partícula final deseado (d₅₀ o P₅₀), eficiencia de molienda (E), carga circulante (CC).

Cabe recalcar que se destacarán aspectos como la eficiencia energética, la capacidad de molienda, la distribución de tamaños de partículas resultante, su sistema de carga y descarga, su capacidad y otras cualidades que puedan aportar al diseño del molino de bolas.

Selección de materiales

En la selección adecuada de los materiales y componentes que se consideraron para la construcción del molino de bolas implicó tener en cuenta durabilidad, rigidez y otras propiedades relevantes de los componentes, como su sistema de accionamiento.

Para ello se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Materiales adecuados para los componentes clave del molino de bolas, como material del cilindro y las bolas de molienda.

Tabla 1: Fórmulas de variables y parámetros de molienda

✓ Potencia teórica necesaria $P_t = 12.5 * H$	✓ Potencia real necesaria $P = P_t + 20\% * P_t$	✓ Velocidad crítica $V_c = \frac{42.3}{\sqrt{D(m)}}$
✓ Grado de llenado (húmedo) Grado de Llenado = (Volumen de bolas dentro del molino) (Volumen total del molino)	✓ Grado de llenado $J = 1.13 - 1.22 \left(\frac{H}{D}\right) \%$	✓ Energía de bond $E_b = 10 * w_i \left(\frac{1}{\sqrt{F_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{200}}}\right)$
✓ Potencia absorbida y útil $P_a = EB * Q$	✓ Diámetro de las tapas $D_t = D + 2f$	✓ Dimensiones de las tapas del tambor $D_t = D + 2f$
✓ Volumen real del tambor $V_{rm} = \frac{\pi s D^2 * L}{4}$	✓ Velocidad crítica por transmisión $m \cdot \frac{V^2}{R} = m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$	✓ Comprobación de la Velocidad crítica $\frac{\varphi_{p1}}{\varphi_{p2}} = \frac{\varphi_{p1}}{\varphi_{p2}}$
✓ Torque efectuado en el eje del cilindro $\tau_s = \frac{P_{ot p1} \cdot \eta^2}{\omega_A}$	✓ Volumen que ocupa las Bolas y el Mineral $V_r = 0.5 \cdot V_c = 0.5 \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot l$	✓ Peso que ejerce el Material Ingresado al Cilindro $F_T = V_M \cdot V_T + V_B + V_A \cdot V_A$
✓ Torque máximo que se va a aprovechar $\tau_A = F_T \cdot r_G$	✓ Potencia máxima que se va a aprovechar $P_{ot p2} = \frac{\tau_A \cdot \omega_A \cdot F_S^2}{\eta^2}$	✓ Número de correas o bandas $z_{c1} = \frac{P_{ot p2}}{P_{ot c1}}$

Fuente: Tomado de (Amores Balseca & Maldonado Bernabé, 2019)

- Materiales para la construcción del molino de bolas: Se seleccionaron materiales adecuados que pueden incluir acero inoxidable, acero al carbono, acero al manganeso, material de oleoducto, cerámica, polímeros y otros.

nera eficiente y efectiva, evitando retrasos y asegurando la calidad del resultado final.

Tabla 2: Lista de componentes

Elemento	Cantidad	Nº de pieza
1	1	Base de la máquina
2	1	Base del motor
3	1	Pasador de base motor
4	2	SKF SY 1.1/2 FM
5	1	Correa A53
6	2	SKF SY 1 TR
7	1	Correa A47
8	1	Motor S6 right
9	1	Regulación del motor
10	1	Eje medio
11	1	Polea escalonada
12	3	Poleas
13	2	Chaveta eje medio
14	1	Tornillo de sujeción
15	1	Caucho tapa del cilindro
16	1	Polea 1.1.

Diseño y dimensionamiento del molino de bolas

En la fase de selección de características para el diseño del molino de bolas, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las ecuaciones y modelos matemáticos generales asociados a distintos tipos de molinos.

Posteriormente, se emplearon métodos matemáticos para determinar las dimensiones y especificaciones óptimas del equipo con la intención de maximizar la capacidad de molienda (Q) y la eficiencia del molino de bolas, asegurando un diseño eficiente y seguro. En este proceso, considerando factores como la velocidad de rotación (N), el diámetro del tambor (D) y la carga de bolas (Cb).

Para llevar a cabo el diseño, se emplearon herramientas CAD que facilitaron la creación de modelos en 3D, planos técnicos y simulaciones como son: AUTOCAD, Inventor y Solidworks.

Cálculo modelado de parámetros y variables

Se utilizó ecuaciones y modelos matemáticos para diámetro del tambor, volumen del tambor, velocidad de rotación, transmisión óptima, entre otros. Estos cálculos proporcionarán datos fundamentales para el análisis de comportamiento y rendimiento del molino de bolas.

Para la obtención de las variables y parámetros se deben aplicar fórmulas, las cuales tenemos en la Tabla 1.

Selección y lista de componentes para la construcción

Durante esta fase, se realizó un proceso detallado para identificar y elegir los componentes necesarios para la construcción del molino de bolas. Esto implicó una evaluación exhaustiva de los requisitos del diseño y las especificaciones técnicas, así como la investigación y selección de los componentes adecuados, una vez seleccionados, se elaboró una lista detallada de todos los componentes necesarios, lo que sirvió como guía durante la fase de construcción.

Este proceso garantizó que se dispusiera de todos los elementos necesarios para llevar a cabo la construcción de ma-

Organización y verificación de componentes

Los componentes del molino de bolas se organizaron de acuerdo con los subconjuntos y etapas de ensamblaje previamente definidas en los planos técnicos. Cada componente fue minuciosamente verificado en términos de calidad y especificaciones, utilizando medidas precisas para asegurar la compatibilidad y la alineación correcta.

Montaje, integración y calibración

Con los componentes previamente verificados, se procedió al montaje y la integración en una secuencia planificada. Se prestó especial atención a la correcta disposición y conexión de sistemas interdependientes, como los mecanismos de transmisión y rodamientos. Mediante mediciones precisas y comparaciones con los valores teóricos, se aseguró que cada elemento estuviera optimizado para lograr un rendimiento óptimo, además la conformidad con los planos técnicos y las especificaciones fue rigurosamente evaluada, y se tomaron medidas adicionales para asegurar la precisión de las uniones.

Caracterización de las muestras provenientes de la región sur

Para llevar a cabo esta validación, se obtuvieron muestras representativas de los materiales mineralizados de la región. Estas muestras se sometieron a ensayos de laboratorio para conocer sus propiedades índices.

- Contenido de humedad:

$$CH = \frac{W - W_{SECO}}{W_{SECO}} \times 100$$

- Porosidad eficaz:

$$n_e = \frac{W_{sat} - W_{SECO}}{W_{sat} - W_{sumergido}}$$

- Peso específico aparente:

$$p_a = \frac{W_{SECO}}{W_{sat} - W_{sumergido}} \times p_w$$

- Peso específico real:

$$p_r = \frac{W_{pulverizada}}{W_2 - W_{pulverizada} - W_1} \times p_w$$

- Porosidad:

$$n = \left(1 - \frac{p_a}{p_r}\right) \times 100$$

- Porosidad cerrada:

$$n_c = n - n_e$$

- Coeficiente de absorción:

$$C_{abs} = \frac{W_{sat} - W_{SECO}}{W_{SECO}} \times 100$$

- Módulo de saturación:

$$M_{sat} = \frac{n_e}{n} \times 100$$

Preparación de las muestras para las pruebas de molienda

Para la etapa de preparación de muestras, se emplearon muestras de material mineralizado provenientes de la región sur del país, con un total aproximado de 4 a 6 kg por cada muestra de mineral. Las muestras de mineral seleccionadas se sometieron a operaciones mecánicas de reducción de tamaño con el fin de obtener el tamaño adecuado para la alimentación del molino de bolas. También se realizó el análisis y caracterización de la distribución del tamaño de las partículas, para lo cual se usó el método Rosin-Rammler con las siguientes fórmulas (ver Tabla 3.):

Preparación para las pruebas de molienda

- **Paso 1: Preparación del molino de bolas**

Se verificó que el molino estuviera ensamblado correctamente y que los componentes estuvieran en óptimas condiciones. El molino de bolas se preparó con todos los accesorios y complementos necesarios para los ensayos, teniendo en cuenta la tensión de las bandas y la lubricación de los rodamientos para garantizar un funcionamiento óptimo del equipo.

Tabla 3: Rosin-Rammler

✓ Retenido %	✓ Retenido Acumulado
$Ret \% = \frac{Masa\ retenida\ tamiz}{Peso\ total} \times 100$	$Ret\ acumulado \% = Ret\ acumulado + Ret\ \%$
✓ %AC (%) F(d) F(d)AC = 100 - Ret acumulado	1/(1-f(d)/100)
✓ Y lnln(...) $\ln(\ln(...)) = Y \cdot \ln\left(\frac{1}{1-f(d)/100}\right)$	X ln(d) =ln(tamaño en micras del tamiz)
$\%F(d) = \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{Tamaño\ en\ micras}{d^*}\right)^M\right)\right) \times 100$	

- **Paso 2: Establecimiento del Procedimiento**

Se desarrolló un procedimiento operativo estándar (SOP, por sus siglas en inglés) exhaustivo y detallado para estandarizar la ejecución de los ensayos cuantitativos. Este protocolo incluyó la descripción precisa de cada paso a seguir, la identificación de los instrumentos y equipos necesarios, así como los criterios de evaluación y los estándares de calidad exigidos para la validación de los resultados.

- **Paso 3: Ejecución de los Ensayos**

Bajo las directrices previamente definidas en el protocolo y asegurando la coherencia y la fiabilidad de los datos obtenidos a lo largo del proceso experimental de desarrollo este paso. Se incluyó resultados de medición, tiempo de molienda, velocidad de rotación y otras variables relevantes. A continuación, se presenta el listado de los ensayos que se realizaron para la validación del molino de bolas:

- Ensayo de eficiencia de molienda
- Ensayo de distribución de tamaños
- Medición del ruido

Descripción de los ensayos realizados

- **Ensayo 1: Ensayo de eficiencia de molienda**

Este ensayo se realizó para medir la eficiencia del molino en la reducción del tamaño del material de prueba. Se registraron con precisión los tiempos de molienda requeridos para alcanzar un tamaño de partícula específico, calculando la eficiencia en función del tiempo y la energía consumida durante el proceso de molienda

Pasos seguidos para la realización del ensayo:

- Establecimiento de condiciones experimentales:** Se definieron las condiciones experimentales para el ensayo, incluyendo la carga de bolas, la velocidad de rotación del molino, el tiempo de molienda y el tamaño de alimentación del material. Estas condiciones se seleccionaron cuidadosamente para simular las condiciones operativas reales del molino construido en un entorno de laboratorio controlado.
- Preparación de la muestra:** Se preparó una muestra del material a moler con una granulometría específica. La granulometría de alimentación pudo haber tenido un impacto significativo en la eficiencia de molienda.

- C. **Pesado de la muestra:** Se pesó la cantidad deseada de material a moler con la balanza analítica.
- D. **Carga del molino:** Se introdujo la muestra y las bolas de molienda en el molino de bolas.
- E. **Inicio de molienda y tiempo de molienda:** Se encendió el molino de bolas y se definió un tiempo de molienda adecuado para el material a evaluar. El tiempo de molienda fue de 2 horas donde se hicieron intervalos de medición cada 15 minutos, esto podría variar según la dureza del material y la finura deseada.
- F. **Descarga del material molido:** Se detuvo el molino en los intervalos establecidos y se descargó parte del material molido.
- G. **Tamizado:** Se tamizó el material molido utilizando tamices de diferentes aberturas para clasificar las partículas según su tamaño y tiempo de molienda.
- H. **Pesado de las fracciones:** Se pesaron las fracciones de material retenidas en cada tamiz.
- I. **Cálculo de la eficiencia de molienda:** Se utilizó el método de Índice de Bond para calcular la eficiencia de molienda.
- J. **Análisis estadístico:** Se realizó un análisis estadístico de los resultados para determinar si existe una diferencia significativa en la eficiencia de molienda con los intervalos de tiempo.
- E. **Secado del material:** Como el material molido presentaba humedad, se debió secar en un horno a una temperatura adecuada hasta alcanzar un peso constante.
- F. **Selección de tamices:** Se seleccionó una serie de tamices con aberturas que cubrieran el rango de tamaños de partículas de interés para el análisis, siendo el último tamiz de malla 200.
- G. **Pesado de la muestra:** Se pesó una cantidad precisa de material molido con la balanza analítica.
- H. **Tamizado y pesado de las fracciones:** Se colocó la muestra de material molido sobre la serie de tamices previamente seleccionados y se agitó manualmente o con un tamizador mecánico durante un tiempo determinado. Se pesaron las fracciones de material retenidas en cada tamiz.
- I. **Cálculo de la distribución granulométrica:** Se calculó el porcentaje de material retenido en cada tamiz y se graficó la distribución granulométrica.

Ensayo 3: Medición nivel de ruido

Ensayo 2: Ensayo de Distribución de Tamaños

Se realizó un ensayo para medir la distribución de tamaños de partículas del material molido utilizando la técnica de análisis granulométrico. Se determinó con precisión el porcentaje de material contenido en diferentes rangos de tamaño, lo que proporcionó información crucial sobre la uniformidad y la consistencia del producto final obtenido.

Pasos seguidos para la realización del ensayo:

- A. **Selección del material de prueba:** Se seleccionó una cantidad de muestra representativa del material mineralizado proveniente de la región sur del Ecuador (3 kg).
- B. **Carga del molino:** Se cargó el molino de bolas con la cantidad de muestra de material mineralizado previamente señalada y un número determinado de bolas de molienda. La proporción entre el material y las bolas, así como la carga total del molino, se determinaron de acuerdo con las dimensiones del diseño establecido.
- C. **Establecimiento de condiciones experimentales:** Se definieron las condiciones experimentales para el análisis granulométrico, incluyendo la velocidad de rotación del molino, el tiempo de molienda y el tamaño de alimentación del material. Estas condiciones se seleccionaron cuidadosamente para simular las condiciones operativas reales del molino en un entorno de laboratorio controlado.
- D. **Extracción y análisis de la muestra:** Una vez completado el tiempo de molienda especificado, se detuvo el molino y se extrajo una muestra del material molido.
- A. **Selección y Calibración del Equipamiento:** Se seleccionó el sonómetro del laboratorio de la universidad (Extech 407750) que cumple con las especificaciones y normativas pertinentes. Antes de las mediciones, se calibró el sonómetro utilizando un calibrador acústico certificado para asegurar su precisión.
- B. **Ubicación Estratégica:** Se seleccionó la ubicación de medición de acuerdo con los objetivos del estudio. Se consideraron la distancia a la fuente de ruido, la geometría del entorno y la posible presencia de obstáculos que pudieran influir en la propagación del sonido.
- C. **Medición del Nivel de Ruido:** Se llevó a cabo la medición del nivel de ruido en decibelios (dB) en dos partes: la primera cuando inicia la molienda y la otra cuando termina la molienda, en intervalos de 3 minutos, luego se registraron tanto el nivel máximo como el mínimo de ruido.
- D. **Análisis y Procesamiento de Datos:** Una vez completadas las mediciones, se procedió al análisis de los datos recopilados. Esto incluyó el cálculo promedio de los niveles tanto máximos como mínimos del nivel de ruido.
- E. **Interpretación de Resultados:** Se evaluó si los niveles de ruido y se identificaron posibles acciones correctivas o medidas de mitigación si era necesario.

RESULTADOS

Cálculos de las variables, parámetros y características

Tambor

Se inició con la parte más importante de la máquina el cual es el tambor, este fue pensado y diseñado como se indica en la Figura 1 para moler una cantidad de material mayor a 3 kg, el material del tambor es un tubo de vapor para oleoductos

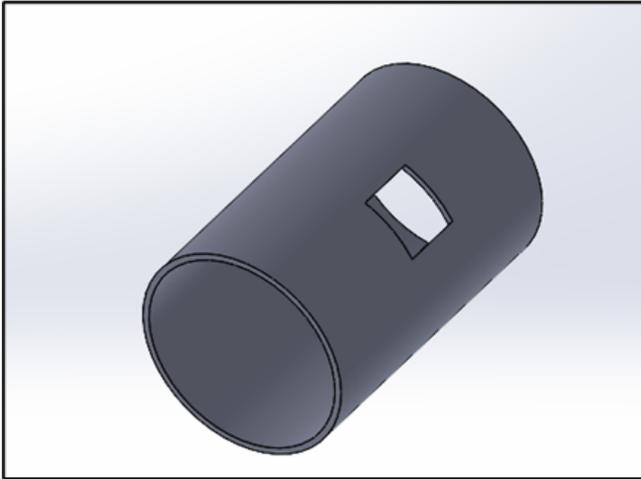


Fig. 1: Depresión como rasgo por género
Nota: Elaborado por el autor.

conocido como API 5L X52 (los tubos de vapor para oleoductos suelen estar fabricados con acero al carbono o aleaciones de acero con ciertas características para resistir altas temperaturas y presiones), el cual es una aleación de acero al carbono con una composición química:

- Carbono (C): 0.16 % - 0.45 %
- Manganeso (Mn): 1.40 % - 1.65 %
- Fósforo (P): máximo 0.025 %
- Azufre (S): máximo 0.015 %
- Silicio (Si): 0.40 % - 0.60 %

Además, pueden existir trazas de otros elementos como vanadio (V), niobio (Nb), titanio (Ti) u otros para mejorar propiedades específicas.

Espesor del tambor

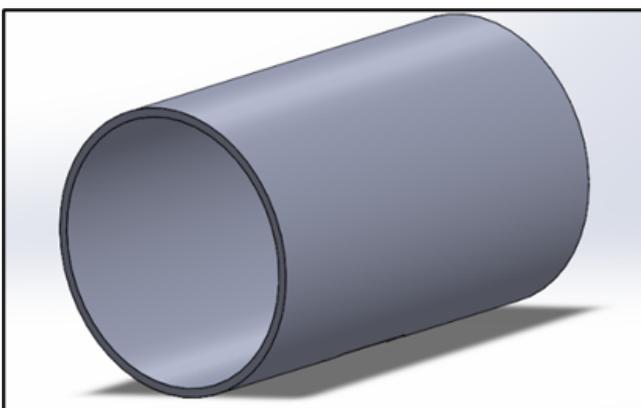


Fig. 2: Vista en alzado del tambor para evidenciar el espesor
Nota: Elaborado por el autor.

La necesidad de determinar el grosor del tambor se fundamentó en su capacidad para resistir las fuerzas generadas durante el proceso de molienda. Tras un análisis exhaustivo, se estableció que un grosor de 12 mm resultaba óptimo desde una perspectiva económica y técnica debido a que proporciona la resistencia mecánica necesaria para soportar las cargas

generadas durante la operación del tambor sin deformaciones excesivas ni fallos estructurales. Además, este grosor ayuda a distribuir de manera uniforme los esfuerzos, minimizando los puntos de tensión concentrada y reduciendo el riesgo de fracturas o fisuras, conociendo todo ello se puede realizar su diseño como se indica en la Figura 2.

Volumen real del tambor

$$V_m = \frac{\pi \times D^2 \times L}{4}$$

Donde:

- V_m : Volumen en metros cúbicos (m^3)
- D : Diámetro en metros (m)
- L : Longitud en metros (m)

$$V_m = \frac{\pi \times (0,32)^2 \times 0,52}{4}$$

$$V_m = 0,041 m^3$$

Dimensionamiento de las tapas del tambor

Tapa de tambor

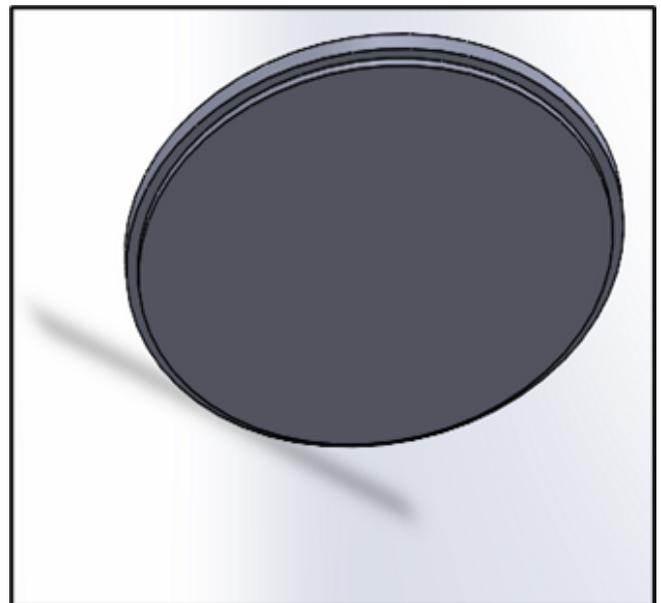


Fig. 3: Vista en alzado del tambor para evidenciar el espesor
Nota: Elaborado por el autor.

Para el diámetro de las tapas del tambor se utilizó la siguiente fórmula:

$$D_t = D + 2f$$

Donde:

- D_t : diámetro de las tapas del tambor en cm
- D : diámetro interior del tambor en cm
- f : espesor en m

$$D_t = 0,29 + 2 \times 0,015D_t = 0,32 m = 32 cm$$

Grado de llenado

Dado que el grado de llenado fluctúa entre 0,20 y 0,45, es fundamental seleccionar un porcentaje óptimo de llenado, para lo cual nos vamos a guiar de la siguiente forma:

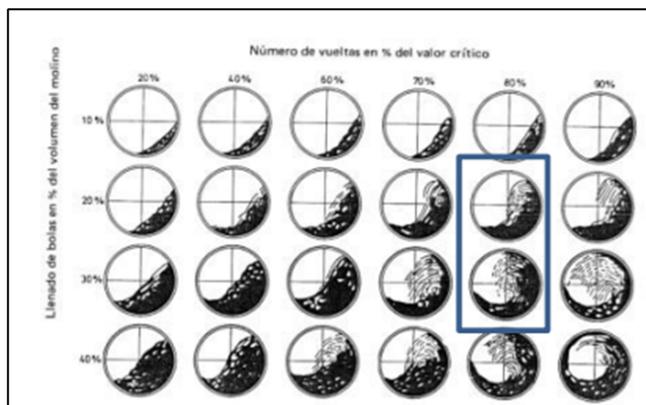


Fig. 4: Determinación del grado de llenado
Fuente: (Cevallos Villavicencio & Caiza López, 2019)

En teoría, se busca generar un sistema de cascada dentro del molino, por eso se elige una velocidad crítica del 80 % y un grado de llenado del 0,25-0,26 como se indica en la figura 4. Esta combinación según pruebas parece ofrecer una capacidad de respuesta óptima para lograr el sistema deseado.

Datos generales del molino Los datos generales del molino diseñado se los a recopilado en la Tabla 4.

Tabla 4: Datos Generales del Molino

Parámetro	Valor
Largo	32 cm
Diámetro	52 cm
Volumen real	0.041 cm ³
Velocidad Crítica	73.125 rpm
DK	26%
%C de llenado	30%
Mb masa de bolas	0.061 tn (60.657 kg)
Volumen del cilindro	44475.53 cm ³
Área de las bases	855.30 cm ²
Radio	16.5 cm

Nota: Elaborado por el autor

Gradiente de molienda

Visualizar la Tabla 5.

Tabla 5: Gradiente calculada del Molino

Gradiente	Bola (in)	Tamaño Intermedio	%DB	% Retenido
Tamaño de bola óptimo (Xo)	3.5	1.87	8.03	91.97
Tamaño de bola final (Xf)	0.68	1.22	1.36	6.67
Masa de bolas (kg)	60.66	0.82	0.17	1.19
	0.68	0.00	0.17	
TOTAL				99.83

Nota. Elaborado por el autor

Potencia teórica necesaria

Los molinos con el grado de llenado y velocidad crítica adecuados, se puede determinar mediante la siguiente for-

mula:

$$Pt = 12,5H$$

Dónde:

P_t : potencia teórica necesaria en CV

H : peso neto total de la carga [ton]

$$Pt = 12,5 \times 0,0475 \text{ ton}$$

$$Pt = 0,60 \text{ CV}$$

$$Pt \approx 0,59 \text{ HP}$$

Potencia real necesaria Los molinos de bolas necesitan una potencia adicional del 15 % al 20 %. Esto significa que, dependiendo de los grados de llenado, el molino requerirá entre un 6 % y un 11 % más de la potencia teórica real para su funcionamiento

$$P = P_t + 20 \% \cdot P_t$$

$$P = 0,59 + 0,118$$

$$P = 0,708 \text{ HP}$$

Como en el mercado no se encuentran motores de 0.708 HP se procede a escoger un motor bajo norma el cual es de 3/4 HP. Siendo seleccionado un motor monofásico eléctrico con entrada de 110 y 220 V.

Selección de la transmisión

La elección entre bandas o cadenas como sistemas de transmisión para este tipo de molino implica tener en cuenta que las bandas tienden a presentar una eficiencia que disminuye de alrededor del 98 % a un 93 %, además de que su implementación es más barata comparado con el de cadena. Llegando a la conclusión en base a sus características, se va a utilizar una transmisión por banda que funcionará con tres poleas usadas de la siguiente manera:

- Una polea escalonada de 2, 3 y 4 pulgadas, la cual va unida al segundo eje junto a otra polea más grande
- Una polea de 3 ½ pulgadas, la cual va unida directamente al motor
- Una polea de 12 pulgadas unida directamente a un eje junto a una polea escalonada
- Una polea de 14 pulgadas unida directamente al eje.

Análisis de la transmisión

Se analizaron los datos necesarios en la máquina molino de bolas para comprobar si la misma tenía la cantidad de correas necesarias y si las relaciones de transmisión eran las más óptimas para la transmisión de la potencia final necesaria

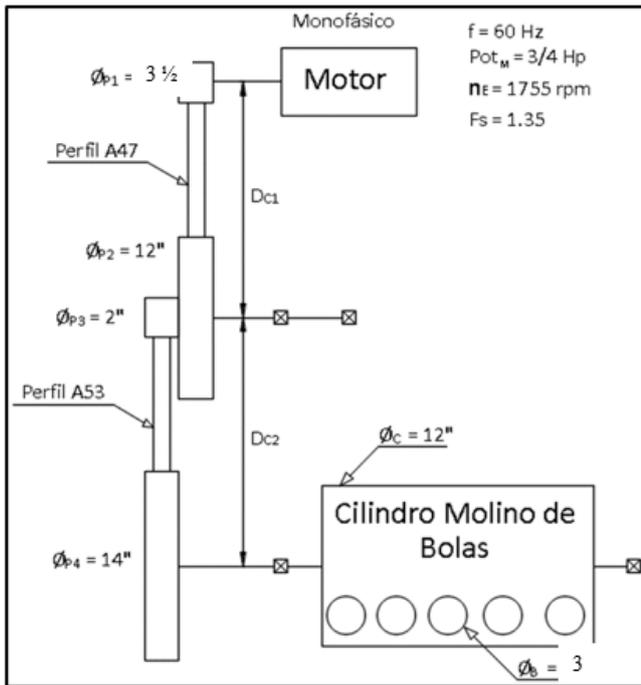


Fig. 5: Análisis de transmisión del molino de bolas
Nota: Elaborado por el autor

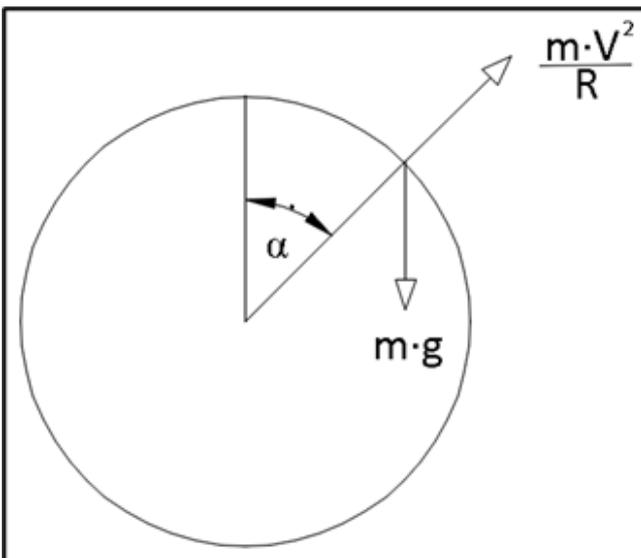


Fig. 6: Diagrama cinemático de velocidad crítica del molino. indica las fuerzas a las que están sometidas las bolas de acero dentro del cilindro
Nota: Elaborado por el autor

Determinación de la Velocidad Crítica del Molino de Bolas

Mediante el siguiente esquema cinemático se procedió a determinar la velocidad crítica:

Primero: Se determinó la velocidad crítica del molino de bolas para, a través de esto, obtener el punto de máximo rendimiento en la obtención del material

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = m \cdot g \cdot \cos(x)$$

$$V = n_c \cdot R \cdot \frac{30}{\pi}$$

$$\frac{n_c \cdot R/30^2}{R} = g; \quad R = \frac{Q_c - Q_b}{2}$$

$$n_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{Q_c - Q_b}} = 30 \left(\frac{2 \cdot 32,174 \text{ ft/s}^2}{\pi \cdot (1 \text{ ft} - \frac{1}{3} \text{ ft})} \right)^{1/2} = 93,8176 \text{ rpm}$$

Atendiendo a la recomendación que señala Victor Piqueyas Yepes en base a Wills y Napier-Munn (2006), “El molino deberá trabajar entre un 50 % y un 90 % de su velocidad crítica, dependiendo de factores económicos. No obstante, el punto de máximo rendimiento, medido por la potencia necesaria para accionar el molino, está en torno al 75 %, y se suele utilizar velocidades de rotación de 70-80 % para los molinos de bolas”

Comprobación de la Velocidad Crítica en la Máquina Diseñada

Se calculó la relación de transmisión de potencia total en la máquina con la siguiente fórmula:

$$\frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{p2}} \cdot \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{p1}} = \frac{12''}{3''} \cdot \frac{14''}{2''} = 24$$

Posterior a ello, se realizó el cálculo de la velocidad en la salida en rpm que correspondería al cilindro de bolas.

$$n_s = \frac{n_g}{i_r} = \frac{1755 \text{ rpm}}{24} = 73,125 \text{ rpm}$$

Comprobación de que el Torque en el Cilindro es el Adecuado para que Gire

- Potencia y Torque que entrega el Motor a la Máquina

Se procedió a calcular la potencia que se transmite al cilindro Pot_D considerando las pérdidas de las correas trapecoidales η_C en la segunda transmisión de potencia. Según Dobrovolski, V. (1980) sugiere que “Las pérdidas ... en una transmisión por correa trapecoidal, 4 %” (p. 202).

$$P_{ot_n} = P_{ot_v} - F_s = 0,75 \text{ Hp} - 1,35 = -1,0125 \text{ Hp}$$

$$= -755,0213 \text{ W}$$

Mediante la anterior ecuación se calculó el torque efectuado en el eje del cilindro

$$T_s = \frac{P_{ot} \cdot \eta_c}{\omega_4} = \frac{753,0213 \text{ W} \cdot 0,96}{6,5637 \text{ rad/s}} = 106,0117 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Volumen que ocupa las Bolas y el Mineral a Triturar

De acuerdo a Bravo Galvéz, A. C. (2003), “El porcentaje de sólidos para una operación eficiente no debería pasar de 40 %”.

$$V_T = 0,5 \cdot V_C = 0,5 \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot l$$

$$V_T = 0,5 \cdot \pi \cdot (6 - 0,0254 \text{ m})^2 - (0,52 \text{ m})^2 = 0,019 \text{ m}^3$$

Se conoce que el molino de bolas trabaja con 10 bolas de tamaño máximo, por ende, tenemos un volumen total ocupado por las bolas de inercia en el interior del cilindro V_B igual a la siguiente ecuación.

$$V_B = \frac{4}{3}\pi(r_B)^3 = \frac{4}{3}\pi(2 \cdot 0,0254 \text{ m})^3 = 0,0055 \text{ m}^3$$

Calculamos el volumen máximo que debería tener la pulpa V_P , mediante la siguiente ecuación

$$V_P = V_T - V_B = 0,019 \text{ m}^3 - 0,0055 \text{ m}^3 = 0,0135 \text{ m}^3$$

De acuerdo a 911Metallurgist (s.f.), “El porcentaje de sólidos en la pulpa es usualmente mantenido de 60 a 75 por ciento, el principio es mantener el volumen porcentual de sólidos tan alto como sea posible sin pérdida de movilidad del cargo. La proporción correcta de agua dependerá del tipo de mineral, los tipos de minerales lamosos en general requieren una dilución superior que minerales que tienen un bajo contenido de lamas.”. Proponemos un porcentaje de sólidos del 70 % y un porcentaje de agua del 30 % en la pulpa.

Determinación del Peso que ejerce el Material Ingresado al Cilindro

El material con el que están construidas las bolas que destruyen el material rocoso es de acero al manganeso o acero Hadfield que según (Hadfield, R. A., 1888, p. 94), “The specific gravity of manganese steel was approximately the same as ordinary cast steel” [el peso específico del acero al manganeso era aproximadamente el mismo que el del acero fundido ordinario], por ende, sabemos que el peso específico de la mayoría de los aceros es de 7860 kgf/m^3 (Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T. y Mazurek, D. F., 2020, ap. 12). Cornejo Aguiar (2016) afirma que “El Ecuador dispone de variados recursos de RMI o minerales no metalíferos, siendo los más importantes la caliza, mármol, arcillas, yeso, piedra pómez, baritina y la bentonita.”. Mediante esta afirmación obtenemos que en Loja el peso específico más alto de los materiales rocosos antes mencionados lo tiene el granito γ_B con 2770 kgf/m^3 según (Dana, J. D., Hurlbut, C. S. y Klein C., 1981, p. 556). Y el peso específico del agua es de 9810 N/m^3 .

$$F_T = (\gamma_m \cdot V_m + \gamma_B \cdot V_B + \gamma_A \cdot V_A)$$

$$F_T = (27173 \text{ N/m}^3 \cdot 0,0094 \text{ m}^3 + 7106 \text{ N/m}^3 \cdot 0,0055 \text{ m}^3 + 9810 \text{ N/m}^3 \cdot 0,0031 \text{ m}^3)$$

$$F_T = 977,851 \text{ N}$$

Potencia y Torque máximo aprovechado por la Máquina

Calculé el radio de giro de la masa total dentro del cilindro r_G para calcular el torque máximo aprovechado.

$$r_G = \frac{4r}{3\pi} = \frac{4(6'')}{3\pi} = 2,5465''$$

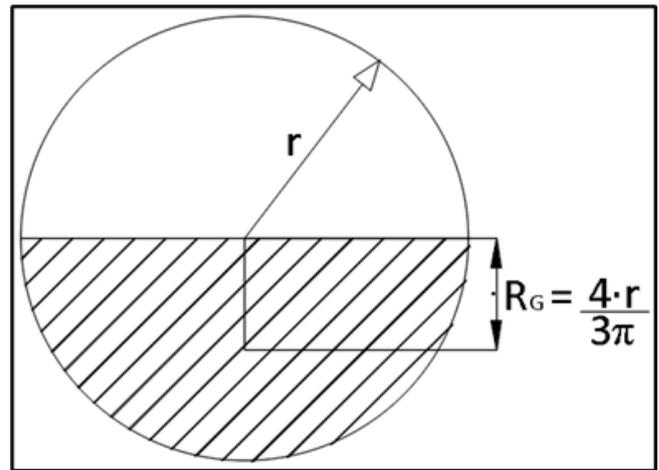


Fig. 7: Diagrama para cálculo del torque máximo del molino
Nota: Elaborado por el autor

Diagrama para cálculo del torque máximo

Mediante este resultado se procedió a calcular el torque máximo que se va a aprovechar A con respecto al molido de bolas.

$$\tau_A = F_T \cdot r_G = (977,851 \text{ N})(2,5465'' \cdot 0,0254 \text{ m}) = 63,2485 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Nota. El factor de servicio seleccionado para la máquina trituradora tipo molino de bolas con motor de corriente alterna asíncrono es de 1.5. Por último, se obtuvo la potencia máxima que se va a aprovechar en el molino de rocas es la potencia diseño (Pot)_{D2} con la que se va a comprobar si el número de correas por cada transmisión de potencia está bien diseñado.

$$Pot_{D2} = \frac{T_a \cdot \omega_4}{\frac{1}{2}n_c^2} =$$

$$Pot_{D2} = \frac{63,2485 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 6,5537 \text{ rad/s}}{0,96^2} = 1,5 = 0,9061 \text{ Hp}$$

Diseño y construcción del molino de bolas

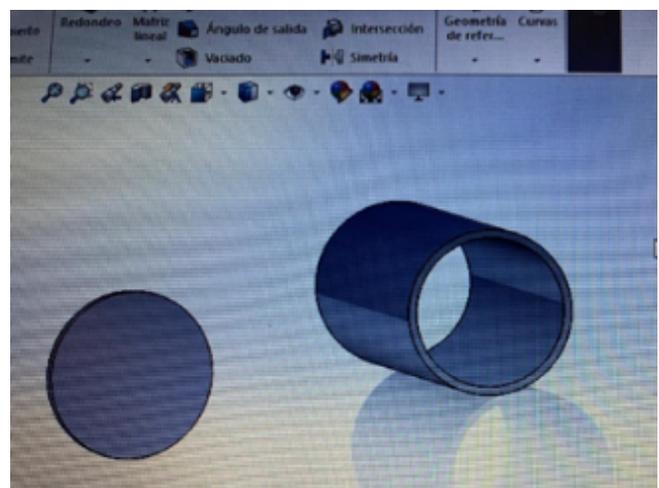


Fig. 8: Proceso de diseño del molino de bolas
Nota: Elaborado por el autor

Se comenzó con la obtención de un tubo de vapor oleoducto para obtener el cilindro o la cámara de molienda y las tapas del cilindro. Una vez obtenido, se procedió a llevarlo al torno para cortar e igualar ambos lados con un largo de 50 cm y un diámetro de 33 cm. Las tapas del cilindro tuvieron dos diámetros, un diámetro mayor de 33 cm con 1 cm de espesor y un diámetro menor de 30 cm con un espesor de 0.5 cm. En el cilindro se realizó una apertura en el centro de 10 cm x 10 cm, la cual servirá como boca de entrada del molino. Por último, se procedió a soldar todas las partes mencionadas anteriormente con suelta autógena dándonos como resultado un cilindro con tapas de medidas 52 cm de largo y 33 cm de diámetro.



Fig. 9: Ejes del cilindro
Nota: Elaborado por el autor

Para el cilindro se utilizaron dos ejes de acero, uno más grande de 25 cm y otro más pequeño de 15 cm, ambos con un diámetro de 4 cm. El motivo de ello fue que el eje más largo se destinó para la colocación de las poleas necesarias para la transmisión mencionada anteriormente. Durante la colocación de los ejes, las tapas se montaron en el torno por separado para permitir la realización de una pequeña hendidura en la mitad, con un grosor de 0.25 cm. Esto se hizo con el fin de asegurar y alinear correctamente el eje al soldarlo a la tapa. Al eje más largo se le redujo el diámetro a 3 cm a lo largo de 14 cm de su longitud. Finalmente, se soldó la tapa al eje mediante soldadura autógena y se reforzó con pequeños triángulos de 6 cm de largo y 5 cm de alto.

Tapa y Seguro del cilindro

Para la tapa del cilindro, se cortó un cuadrado del material del cilindro de 10 cm x 10 cm con un grosor de 1.5 cm. Esta se soldó sobre otra tapa de 15 cm x 15 cm con un ancho



Fig. 10: Ejes y cámaras de molienda
Nota: Elaborado por el autor

de 0.5 cm. En esta segunda tapa se realizó una boquilla en el centro de 3.5 cm de diámetro. Luego, se llevó a cabo el empaque con látex (caucho) de 15 cm x 15 cm con un grosor de 0.4 cm para evitar derrames. Para el seguro, se soldaron dos orejas en el tanque de 7.5 cm de alto con una apertura de 5 cm. Se soldaron a una distancia de 5 cm con respecto a la apertura del tanque.

Se cortaron dos barras de acero de 10.5 cm de largo y 2.5 cm de ancho. Ambas fueron soldadas una frente a la otra en una tuerca de 2.7 cm de diámetro. Luego, se introdujo un perno hexagonal de acero de 2.7 cm de diámetro. Por último, se colocó primero la tapa del molino. Luego, se colocó el seguro en el medio de la tapa para que quedara entre las orejas. Se procedió a girar el perno para asegurarlo y evitar que se cierre durante el proceso de molienda.

Mesa

Para la construcción de la mesa se utilizó tubo cuadrado de 5 cm x 5 cm, con las siguientes medidas:

- 4 patas de 66 cm.
- 2 tubos laterales de 72 cm.
- 1 tubo adicional de 62 cm.

Se emplearon 4 cuadrados de 10 cm x 10 cm para las bases de las patas, asegurando así la estabilidad. Se soldaron todas las partes de la mesa correspondientes a las patas, las bases y los laterales de estas. El tubo adicional se adhirió a 5 cm de la parte trasera de la mesa, asegurando su estabilidad durante el proceso de molienda.



Fig. 11: Tapa y seguro del cilindro
Nota: Elaborado por el autor



Fig. 12: Diseño de mesa cuadrada que servirá como soporte para el molino
Nota: Elaborado por el autor

Chumaceras y Polea principal del cilindro

Se utilizaron dos chumaceras P 208 diseñadas para un eje de 1-½ pulgada y se introdujeron en los ejes del cilindro. La estructura del molino se montó sobre la mesa, asegurando las chumaceras con un lateral a la mesa y otro con L de 4 cm de metal soldadas para cada pata lateral de chumacera saliente. Luego se procedió a colocar la polea principal o primera polea en el eje más largo, introduciéndola hasta que quedara a 7.5 cm de la chumacera.

Segunda polea y chumaceras

Para la colocación de la segunda polea, se obtuvo un eje de 26 cm de largo y 3 cm de diámetro, así como dos L de 17 cm de largo y 4 cm de alto. Una de las dos L se soldó de forma perpendicular al tubo cuadrado del centro de la mesa, y la otra se soldó a 13.5 cm de la L ya colocada. Se introdujo la primera polea de 12 pulgadas en el eje mediante una presión de 60 toneladas, a una distancia de 9 cm. Posteriormente, se colocó la segunda polea, escalonada de 2, 3 y 4 pulgadas, aplicando igualmente 60 toneladas de presión hasta que tocó la primera polea. A dicha estructura de poleas se le colocaron



Fig. 13: Chumacera y polea principal
Nota: Elaborado por el autor

las chumaceras P205 de 25.4 mm de diámetro del eje, y luego se colocó todo sobre las L previamente soldadas



Fig. 14: Toma de medidas para colocación de segunda polea
Nota: Elaborado por el autor

Preparación del motor

Para la preparación del motor, primero se colocó su respectiva polea escalonada de 3 ½ pulgadas. Posteriormente, se construyó una base de planta metálica con medidas de 25 cm de largo y 11 cm de ancho para montar el motor lateralmente. En esta base, se soldó una bisagra que servirá para tensar la banda de transmisión. Además, se perforó un agujero de 2 cm de diámetro para la introducción de un perno templador de 16 cm de largo.

Esta estructura se soldó en la pata de la mesa, teniendo en cuenta la alineación con respecto a la segunda polea. Para reforzar esta estructura, se soldó diagonalmente un rectángulo



Fig. 15: Preparación de base metálica para montaje lateral del motor

Nota: Elaborado por el autor

de 25.5 cm de largo y 6 cm de ancho. También se soldó una estructura triangular con dos rectángulos de 5 cm de largo por 4 cm de ancho para poder colocar el perno templador. El motor se diseñó para conexión 220V, y se atornilló una botonera en la pata paralela al motor.



Fig. 16: Conexión de botonera

Nota: Elaborado por el autor

Bandas para la transmisión

La primera banda se extiende desde el motor hasta la segunda polea, con la polea del motor de 3 ½ pulgadas a la polea de 12 pulgadas. Esta banda es una correa clásica en V de tipo A47, con una longitud interna de 47", una longitud externa de 49", un ancho superior de 1/2τ un peso de 0.30 lb. La segunda banda se extiende desde la segunda polea hasta la polea del tanque, exactamente desde las 2 pulgadas escalonadas hasta la polea de 14 pulgadas. Esta banda es una correa clásica en V de tipo A53, con una longitud interna de 53", una longitud externa de 55", un ancho superior de 1/2τ un peso de 0.34 lb.

Tolva con Bandeja

La tolva, fabricada de lata, tiene una boca de entrada de 30 cm y una boca de salida de 20 cm. Esta tolva se soldó sobre una bandeja rectangular del mismo material, con medidas de

44.5 cm x 45 cm y una altura de 25.5 cm. Para la base de la bandeja, se soldó un tubo cuadrado largo de 61.5 cm de longitud debajo del cilindro, entre las dos patas. Luego, se sueldan dos L de 35 cm de longitud y 5 cm de altura de forma paralela, a una distancia de 47 cm entre ellas (ver Figura 17).



Fig. 17: Tolva con bandeja

Nota: Elaborado por el autor

Diseño en software Solidwoks y Molino de bolas construido

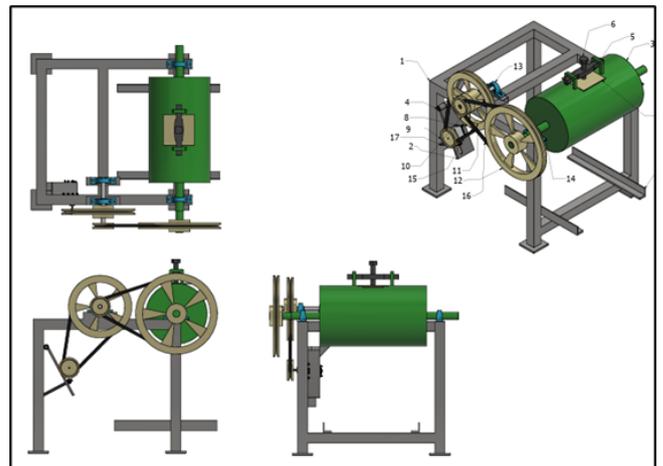


Fig. 18: Diseño en SOLIDWOKS

Nota: Elaborado por el autor

Diseño final del molino

Costo de la máquina

El costo total del molino de bolas, incluyendo la adquisición de materiales, la adaptación y el ensamblaje de sus partes, así como la compra de medios moledores, ascendió a aproximadamente 1500 dólares estadounidenses. Dentro de este presupuesto, la parte más costosa corresponde a la cámara de molienda y la obtención de los medios moledores, dado que estos deben cumplir con las características previamente mencionadas.

Para los ensayos de molienda, se recolectaron cuatro muestras de 6 kg aproximadamente procedentes de la región



Fig. 19: Diseño final del molino
Nota: Elaborado por el autor

sur del Ecuador. Estas muestras fueron sometidas previamente a un proceso de caracterización, el cual incluyó la evaluación minuciosa de sus propiedades índice.

Descripción de las muestras

Tabla 6. Datos generales Muestra 1

Muestra 1	Provincia: Zamora Chinchipe	
	Lugar: Chinapintza	
	Sociedad: El Mirador	
	Tipo de roca: Cuarzodiorita	

Nota. Elaborado por el autor

La Muestra 1 corresponde a una roca tipo cuarzodiorita que presenta un grado medio de alteración. Se observa mineralización en pirita y calcopirita, además de otros minerales como cuarzo, hornblenda, plagioclasas y biotita.

Tabla 7. Datos generales Muestra 2

Muestra 2	Provincia: El Oro	
	Lugar: Torata	
	Tipo de roca: Brecha andesítica	

Nota. Elaborado por el autor

La muestra 2 se identifica como una brecha andesítica, que se encuentra asociada a andesitas de grado medio de alteración. Exhibe una composición mineralógica caracterizada por sulfuros como pirita. Además, dentro de su composición se observan minerales como: cuarzo feldspatos y biotita.

La Muestra 3 está relacionada con una roca andesítica que muestra un grado medio de alteración. Su composición mineralógica abarca la composición en mineralización de sulfuros como pirita y calcopirita, además de minerales principales como cuarzo, biotita, plagioclasas, hornblenda y biotitas.

Tabla 8. Datos generales Muestra 3

Muestra 3	Provincia: Azuay	
	Lugar: Santa Isabel	
	Tipo de roca: Roca andesita	

Nota. Elaborado por el autor

Trabajos previos a la identificación de propiedades índice

Se procedió a seleccionar una muestra representativa de cada muestra mineralizada, las cuales fueron pesadas en una balanza analítica y se registraron los valores correspondientes. Posteriormente, las muestras fueron colocadas individualmente en recipientes y saturadas completamente para dejarlas reposar durante un período de tres días. Tras el transcurso de este lapso temporal, las muestras fueron retiradas, secadas con un paño y nuevamente pesadas. La balanza analítica fue colocada sobre una superficie elevada estable, seguido por la preparación de un recipiente lleno de agua debajo de esta. Utilizando un hilo de nailon, las muestras fueron atadas y suspendidas desde la parte inferior de la balanza, sumergiéndolas en el recipiente para obtener el peso sumergido. Las muestras fueron luego trasladadas a recipientes y sometidas a un proceso de secado en horno durante un día completo. Una vez finalizado este periodo, fueron retiradas, pesadas y trituradas para ser utilizadas en el ensayo del picnómetro. Posteriormente, las muestras trituradas fueron tamizadas a través de dos mallas #100 y #200, reservando el material pasante a través de la malla #200 en contenedores designados para cada muestra con el fin de evitar errores. Se procedió entonces a pesar 30 gramos de cada muestra pasante de la malla #200, y posterior a ello se llenó el picnómetro con agua destilada y se registró su peso.

A continuación, se extrajo parte del agua del picnómetro hasta aproximadamente la mitad de su capacidad. Utilizando un embudo y un alambre, se introdujeron los 30 gramos de muestra, asegurando que el embudo no entrara en contacto con el agua para evitar derrames. Después de introducir la muestra en el picnómetro, este se giró suavemente en círculos durante tres minutos con la ayuda de un paño. Posterior a ello, se llenó el picnómetro con agua destilada, permitiendo que esta cayera suavemente sobre las paredes para evitar la formación de burbujas de aire.

Finalmente, se registró y anotó el peso resultante. Este procedimiento se repitió para las dos muestras restantes, asegurándose de limpiar completamente el picnómetro después de cada medición y volver a llenarlo con agua destilada hasta la mitad antes de repetir el proceso. Todos los datos obtenidos durante el procedimiento fueron registrados en una hoja de cálculo Excel para facilitar el análisis mediante fórmulas matemáticas, obteniéndose los siguientes resultados.

Preparación del material previo a molienda

Con el fin de garantizar la uniformidad y la adecuación del material para su posterior sometimiento al proceso de molienda, se llevó a cabo una fase de trituración y homogeneización donde se buscó que el material tenga un P80 de 3328

Tabla 6: Propiedades índices de las muestras 1, 2 y 3.

Muestra 1: Provincia: Zamora Chinchipe	
Lugar: Chinapinza	
Contenido de humedad: 0.80	
Porosidad eficaz: 4.08	
Peso específico aparente: 1548.87	
Peso específico real: 1615.79	
Porosidad: 4.14	
Porosidad cerrada: 0.06	
Coeficiente de absorción: 1.52	
Compacidad: 95.86	
Módulo de saturación: 98.6	
Muestra 2: Provincia: El Oro	
Lugar: Torata	
Contenido de humedad: 0.60	
Porosidad eficaz: 6.48	
Peso específico aparente: 414.85	
Peso específico real: 457.83	
Porosidad: 9.39	
Porosidad cerrada: 2.91	
Coeficiente de absorción: 2.58	
Compacidad: 90.61	
Módulo de saturación: 69.1	
Muestra 3: Provincia: Azuay	
Lugar: Santa Isabel	
Contenido de humedad: 0.37	
Porosidad eficaz: 7.81	
Peso específico aparente: 1361.75	
Peso específico real: 1605.37	
Porosidad: 15.18	
Porosidad cerrada: 7.36	
Coeficiente de absorción: 3.13	
Compacidad: 84.82	
Módulo de saturación: 51.5	
<i>Nota. Elaborado por el autor</i>	

micras el cual es un valor óptimo antes de ingresar al molino. Para la trituración de las muestras, fueron enviadas al laboratorio de la Universidad Técnica Particular de Loja, con el objetivo de acondicionar las muestras por medio de la trituración. Este proceso se realizó con la finalidad adicional de homogeneizar las muestras, asegurando así una distribución uniforme de las partículas y minimizando posibles variaciones en los resultados del proceso de molienda (ver Figura 20).

Granulometría Rosin-Rammler.

Las muestras mineralizadas fueron sometidas a un proceso de cuarteo con el fin de reducir su proporción inicial y obtener partes representativas de tamaño uniforme. Posteriormente, se seleccionaron dos de las cuatro partes resultantes para llevar a cabo el análisis granulométrico. Se procedió a pesar el material y se seleccionaron tamices de tamaños específicos (3/8, 1/4, 4, 8, 10, 16, 20, 30, 40, 60, 100, 200, base) para

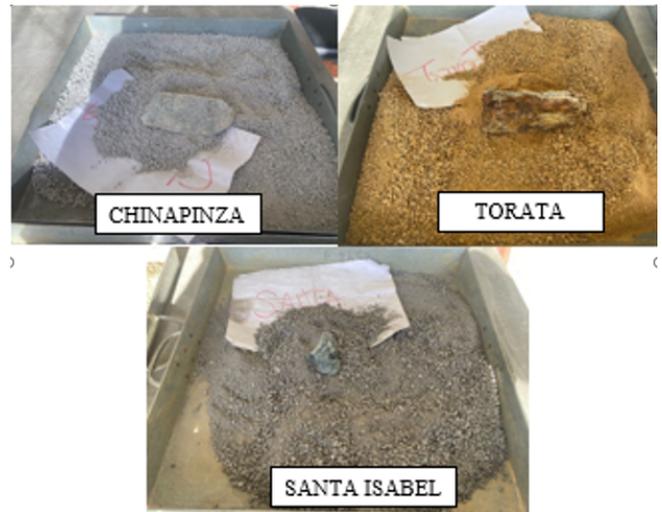


Fig. 20: Material triturado y homogeneizado
Nota: Elaborado por el autor

el tamizado. Una vez pesadas las muestras, se distribuyó la mitad de cada muestra en la serie de los tamices seleccionados, los cuales se sometieron a un proceso de tamizado mediante un tamizador eléctrico, previamente programado para una duración de 6 minutos. Luego se desmontaron los tamices y se procedió a pesar el material retenido en cada uno de ellos. Los valores obtenidos fueron registrados en una tabla de Excel para su posterior análisis y cálculos. Con los datos recopilados, se desarrollaron las fórmulas correspondientes al modelo Rosin-Rammler y se generaron las gráficas pertinentes (ver tabla 49, 50 51), permitiendo así una caracterización detallada de la distribución granulométrica de las muestras analizadas. Este procedimiento proporcionó información crucial para la comprensión de la distribución del tamaño de las partículas después de que se realizó la trituración.

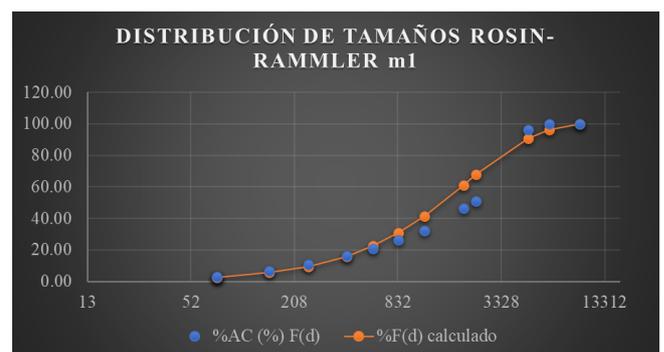


Fig. 21: Granulometría Trituración P80 de Chinapinza Rosin-Rammler
Nota: Elaborado por el autor

Nota: El análisis granulométrico realizado mediante la metodología de Rosin Rammler reveló que las muestras mineralizadas de Chinapinza, Torata y Santa Isabel exhibieron una distribución de tamaños por trituración caracterizada por un valor de P80 de 3328 micras. Este resultado indicó una granularidad adecuada para iniciar las pruebas de molienda en el entorno laboratorial. La realización del análisis se hizo con el propósito de determinar el tamaño inicial del material, denotado como F80, así como para establecer el tamaño de salida después de la molienda, representado por P80.

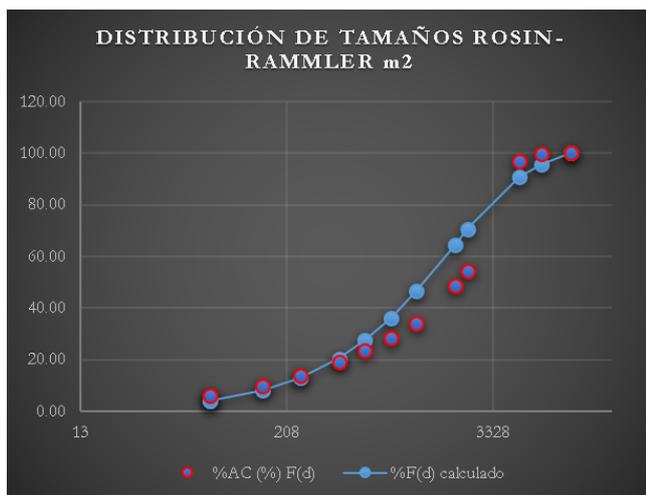


Fig. 22: Granulometría Trituración P80 de Torata Rosin-Rammler
Nota: Elaborado por el autor

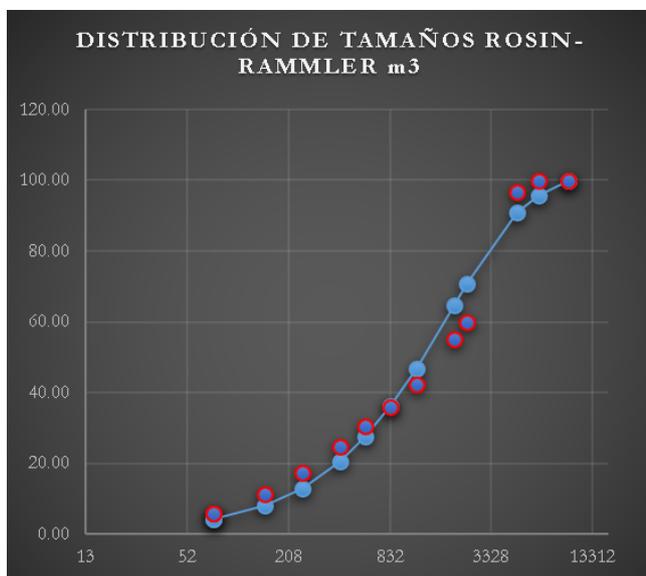


Fig. 23: Granulometría Trituración P80 de Santa Isavel Rosin-Rammler
Nota: Elaborado por el autor

Inspección y Preparación del molino.

Se comenzó por verificar la limpieza y el estado óptimo de funcionamiento del molino, asegurándome que todas sus partes estén debidamente ensambladas y en condiciones adecuadas. Durante esta fase, se llevó a cabo una inspección detallada de los siguientes componentes:

- Tensión de las bandas.
- Estado de la lubricación en las chumaceras.
- Integridad de las conexiones eléctricas del motor.
- Condición del empaque de la tapa del motor

Este proceso de inspección garantizó que el molino estuviera listo para operar de manera eficiente y segura durante los ensayos.

Inicio del proceso de molienda

1. Materiales indispensables para molienda: Entre los materiales indispensables que se utilizaron para llevar a cabo la molienda tenemos:

- La tolva que sirve para colocar el material dentro del molino y evitar derramamientos.
- Llave de tuvo que sirve para cerrar y asegurar la tapa del molino
- Brocha
- Frasco lavador
- Balde



Fig. 24: Materiales para molienda
Nota: Elaborado por el autor

2. Introducción del Material: El material, previamente pesado con precisión, fue introducido en el molino. Junto con ello, se añadieron las bolas de molienda, previamente graduadas, y se agregó agua de acuerdo con la proporción 1/1, es decir una parte de agua por cada parte de material.

Tabla 10. Pesos iniciales previo molienda

Chinapinza	6517.5 gr / 6.517 kg
Torata	6682 gr / 6.682 kg
Santa Isabel	4445 gr / 4.445 kg

Nota: Elaborado por el autor.



Fig. 25: Bolas de molienda correctamente graduadas utilizadas dentro del molino
Nota: Elaborado por el autor

3. Encendido del Molino: Una vez que el material a moler fue introducido en el molino, se cerró herméticamente y se

aseguró el empaque y tapa para prevenir cualquier pérdida de agua. Luego, se procedió a conectar el molino a la fuente de alimentación y se encendió para iniciar el proceso de molienda

4. Tiempo de Molienda: Los materiales mineralizados, fueron sometidos a diferentes tiempos de molienda que variaron entre 1 hora-Santa Isabel, 1 hora 30 minutos-Torata y 2 horas-Chinapinza, con el fin de lograr determinar la relación entre tiempo de molienda y tamaño de partícula deseado

Tabla 11. Tiempos de molienda

	Peso	Tiempo de molienda
Chinapinza	65175 gr / 65.175 kg	2 horas
Torata	6682 gr / 6.682 kg	1 hora 30 minutos
Santa Isabel	4445 gr / 4.445 kg	1 hora

Nota. Elaborado por el autor.

Ensayos de eficiencia de molienda, distribución de tamaños (granulométrico) y medición de ruido.

Condiciones experimentales de las muestras mineralizadas

Se establecieron los parámetros experimentales para los ensayos, los cuales abarcan la carga específica de bolas, la velocidad de rotación del molino, la duración del período de molienda, y las dimensiones de la alimentación del material. Estas condiciones fueron meticulosamente seleccionadas con el propósito de emular las condiciones operativas prácticas del molino diseñado en un ambiente de laboratorio bajo control riguroso.

Ensayo de eficiencia de molienda y distribución de tamaños

-Inicio y tiempo de molienda: Se encendió el molino de bolas y se definió el tiempo de molienda señalado en la tabla 22. **-Descarga del material molido:** Se detuvo el molino en los tiempos establecidos y se descargó el material molido en un valde para luego ser colocado en bandejas. **- Secado del material:** Como el material molido presentaba humedad, se debió secar en un horno a una temperatura adecuada hasta alcanzar un peso constante. **-Tamizado y pesado de las fracciones:** Una vez que el material estuvo seco, se observó que se había compactado en sus bandejas, por lo tanto, se llevó a cabo la extracción del mismo utilizando una espátula y una brocha, con el fin de facilitar el paso de una rueda metálica sobre la superficie compactada. Posteriormente, se procedió a distribuir la muestra de material molido sobre los tamices correspondientes, para luego someterla al tamizador eléctrico durante un período de 4 minutos. Finalmente, se procede a pesar las fracciones de material retenidas en cada tamiz y registrar los valores obtenidos en tablas de Excel. **Cálculo de la distribución granulométrica:** Se calculó el porcentaje de material retenido en cada tamiz y se aplicó el método del método de Rosin-Rammler para calcular la distribución granulométrica.

- Cálculo de la energía requerida en molienda: Se utilizó el método de Energía de Bond para calcular la eficiencia de mo-

lienda.

$$Eb = 10 \times wi \left(\frac{1}{\sqrt{P80}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{F80}} \right)$$

- Energía de Bond de Santa Isabel:

Para calcular la energía de Bond correspondiente a la roca andesita en Santa Isabel, se empleó un índice de trabajo (Wi) de 19 kWh/tonelada obtenida de literatura especializada.

Tabla 12. Energía de Bond. Santa Isabel

EB Santa Isabel	
wi	19
F80 micras	3328
P80 micras	121.6
EB	17.21

Nota. Elaborado por el autor.

Según los resultados obtenidos del cálculo de la energía de Bond, se puede inferir que, debido a la dureza y la escasa alteración del material, así como al tamaño de partícula final de 121.6 micras, la energía de Bond resultante es de 17.56 kWh/tonelada, este valor se considera poco eficiente.

- Energía de Bond de Torata

Para calcular la energía de Bond correspondiente a la brecha andesítica en Torata, se empleó un índice de trabajo (Wi) de 12 kWh/tonelada obtenida de literatura especializada.

Tabla 13. Energía de Bond. Torata

EB Torata	
wi	12
F80 micras	3328
P80 micras	98.4
EB	12.07

Nota. Elaborado por el autor.

Según los resultados obtenidos del cálculo de la energía de Bond, se puede inferir que, debido a la dureza y la escasa alteración del material, así como al tamaño de partícula final de 98.4 micras, la energía de Bond resultante es de 12.07 kWh/tonelada, este valor se considera eficiente.

- Energía de Bond de Chinapinza

Para calcular la energía de Bond correspondiente a la roca cuarzo diorita, se empleó un índice de trabajo (Wi) de 15 kWh/tonelada obtenida de literatura especializada

Tabla 14. Energía de Bond. Chinapintza

EB Chinapintza	
wi	15
F80 micras	3328
P80 micras	72.8
EB	17.56

Nota: Elaborado por el autor

Según los resultados obtenidos del cálculo de la energía de Bond, se puede inferir que, debido a la dureza y la escasa alteración del material, así como al tamaño de partícula final de 72.8 micras, la energía de Bond resultante es de 17.56 kWh/tonelada, este valor se considera eficiente.

- Análisis estadístico: Se realizó un análisis estadístico de los resultados para determinar si existe una diferencia significativa en la eficiencia de molienda con los diferentes tiempos de molienda.

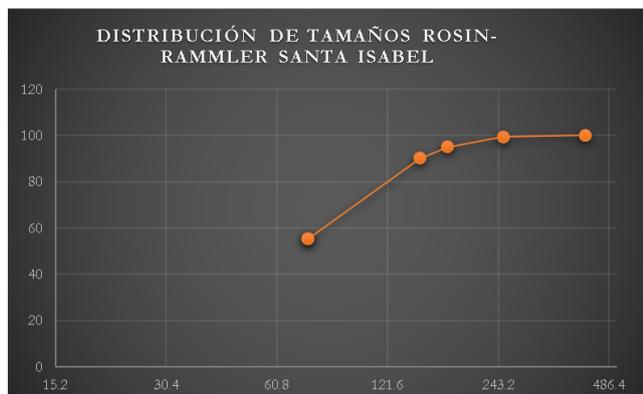


Fig. 26: Distribución de tamaños P80 121.6 micras. Santa Isabel
Nota: Elaborado por el autor

Durante el análisis granulométrico de la muestra de Santa Isabel, con el fin de evaluar el desempeño del molino de bolas a 1 hora, se constató una ineficiencia en el proceso de molienda del material. Esta deficiencia se manifestó en el porcentaje de partículas que atravesaron la malla 200, un parámetro crucial en la caracterización del proceso. De acuerdo con los estándares de la industria minera, se esperaba que este porcentaje superara el umbral del 80%; no obstante, los datos recopilados revelaron un valor de apenas el 58.23%. Además, la representación gráfica del tamaño de partícula exhibió un producto P80 de 121 micras, cifra que excedió el valor óptimo de 74 micras.

Durante el análisis granulométrico de la muestra de Torata, con el fin de evaluar el desempeño del molino de bolas a 1 hora 30 minutos, se constató una ineficiencia en el proceso de molienda del material. Esta deficiencia se manifestó en el porcentaje de partículas que atravesaron la malla 200, un parámetro crucial en la caracterización del proceso. De acuerdo con los estándares de la industria minera, se esperaba que este porcentaje superara el umbral del 80%; no obstante, los datos recopilados revelaron un valor de apenas el 71.43%. Además, la representación gráfica del tamaño de partícula exhibió un producto P80 de 98.4 micras, cifra que excedió el valor óptimo de 74 micras.

Durante el análisis granulométrico de la muestra de Chi-

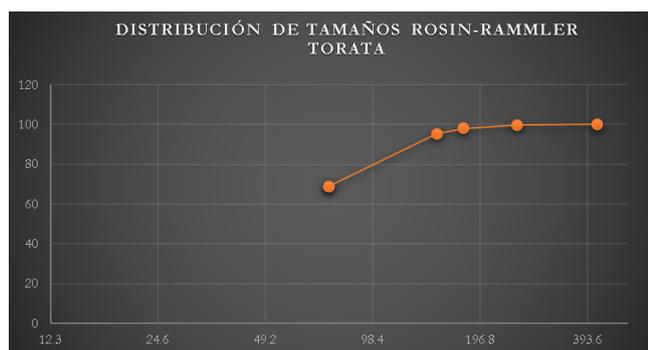


Fig. 27: Distribución de tamaños P80 98.4 micras. Torata
Nota: Elaborado por el autor

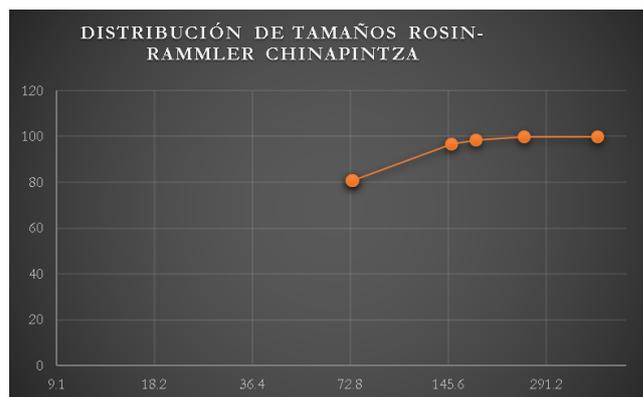


Fig. 28: Distribución de tamaños P80 98.4 micras. Chinapintza
Nota: Elaborado por el autor

napintza, con el fin de evaluar el desempeño del molino de bolas a 2 horas, se constató una eficiencia en el proceso de molienda del material. Esta eficiencia se manifestó en el porcentaje de partículas que atravesaron la malla 200, un parámetro crucial en la caracterización del proceso. De acuerdo con los estándares de la industria minera, se esperaba que este porcentaje superara el umbral del 80%; lo cual se cumplió, ya que los datos recopilados revelaron un valor de 83.01%. Además, la representación gráfica del tamaño de partícula exhibió un producto P80 de 72.8 micras, cifra que no excedió el valor óptimo de 74 micras.

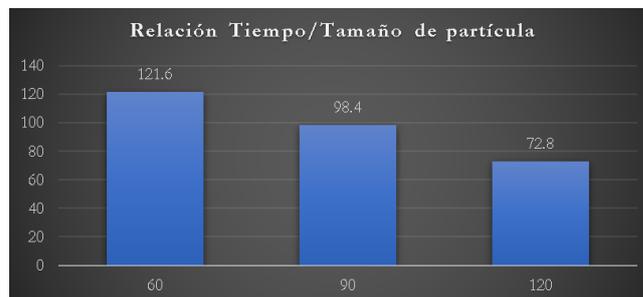


Fig. 29: Distribución Granulométrica en relación al tiempo de molienda
Nota: Elaborado por el autor

La figura 29 trata sobre la relación entre el tiempo de molienda y el tamaño de partícula resultante, esta relación se ve influenciada por diversos factores, entre ellos, la gradiente, el tamaño inicial del material, la velocidad de rotación del molino de bolas, la resistencia del material y su grado de alteración. Estos hallazgos se sustentan que el tiempo de molienda del molino en el laboratorio es de 2 horas porque se ve una mejora en la distribución del tamaño de partícula a lo largo del tiempo de molienda.

• Medición nivel de ruido

La medición del nivel del ruido se la realizó por medio del sonómetro EXTECH 407750 de la Universidad Nacional de Loja. Se siguió el siguiente procedimiento:

- El sonómetro fue colocado a una distancia de 2 metros de la fuente de ruido.
- La medición se inició con especial atención para evitar la presencia de otros generadores de ruido, dado que estos podrían influir en el resultado de la medición.

- Las mediciones se llevaron a cabo cada 2 minutos, dividiéndose en dos fases distintas: el principio y el final de la molienda, con un tiempo total de molienda de 2 horas.
- En cada fase se realizaron 5 mediciones para obtener un promedio representativo, el cual fue posteriormente graficado en un diagrama de barras que incluyó los valores máximos y mínimos.

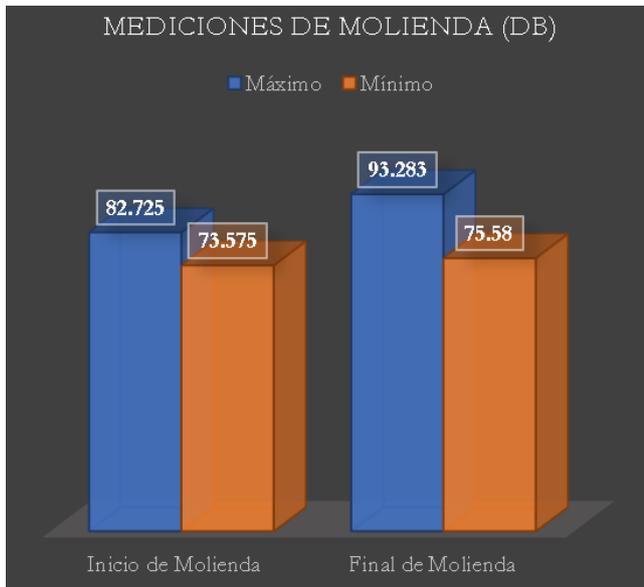


Fig. 30: Máximos y mínimos por medio del sonómetro
Nota: Elaborado por el autor

Nota: Los procesos industriales y las máquinas que generen niveles de ruido iguales o superiores a 85 decibeles, medidos en el entorno laboral, deben ser sometidos a un adecuado aislamiento para evitar la propagación del ruido hacia el exterior de las instalaciones.

DISCUSIÓN

La investigación presentada se centra en el diseño, construcción y validación de un molino de bolas destinado a realizar pruebas de molienda en materiales mineralizados de la región sur del Ecuador. Este proyecto surge de la necesidad de contar con un equipo de laboratorio adecuado que permita evaluar el rendimiento de la molienda en condiciones representativas de los minerales presentes en la zona. En este sentido, se ha realizado un análisis exhaustivo de variables y parámetros clave para asegurar el diseño del molino.

Uno de los aspectos fundamentales considerados durante el proceso de diseño fue la capacidad del molino para procesar un mínimo de cantidad de material de 3kg. Se determinó que un tamaño de tambor capaz de moler la cantidad deseada, teniendo en cuenta que la granulometría final del mineral cumpla con los estándares de eficiencia requeridos. Además, se seleccionó cuidadosamente el material del tambor, optando por un tubo de vapor para oleoductos de acero al carbono con un grosor de 1.5 cm, conocido como API 5L X52, debido a su resistencia a las condiciones de operación esperadas.

El grosor del tambor también fue objeto de análisis detallado, considerando su capacidad para resistir las fuerzas

generadas durante el proceso de molienda. Tras evaluaciones técnicas de seguridad, rendimiento, durabilidad, prevención de fallos e integridad estructural; se determinó que un grosor óptimo de 12 mm desde una perspectiva económica y estructural, proporcionando la resistencia necesaria sin comprometer la eficiencia del equipo. Asimismo, se seleccionaron bolas de molienda de acero al manganeso por su dureza y resistencia al desgaste, elementos cruciales para garantizar una molienda eficiente y duradera. Para optimizar el rendimiento del molino, se estableció una velocidad de rotación del 73.125 % de la velocidad crítica, así como un porcentaje de llenado del 23 %, equilibrando la cantidad de material a moler con el volumen del tambor y el agua a introducir dándonos como resultado una relación 1:1, es decir por cada kg de material se coloca 1L de agua.

La construcción del molino se llevó a cabo en el taller mecánico de la ciudad de Loja y la validación del modelo se la realizó con pruebas en el Laboratorio de Mecánica de Rocas y Materiales de la Universidad Nacional de Loja, siguiendo estrictamente normas técnicas y de seguridad. Una vez construido, se procedió a validar el modelo mediante pruebas de molienda con muestras de mineralizadas de la región sur del Ecuador. Los resultados obtenidos demostraron una eficiencia de molienda creciente con el tiempo, alcanzando un porcentaje pasante de la malla 200 del 82 % y un tamaño de partícula promedio de 72.8 micras después de 2 horas de operación. Sin embargo, se observaron niveles elevados de ruido durante las pruebas, lo que resalta la importancia de implementar medidas de protección auditiva para los operadores.

Adicionalmente se puede decir que la investigación realizada ha permitido desarrollar un molino de bolas eficiente y confiable para la realización de pruebas de molienda en laboratorio con materiales mineralizados de la región sur del Ecuador. Estos resultados proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en el procesamiento de minerales en la zona, contribuyendo al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería de procesamiento de minerales.

Al comparar los resultados obtenidos con los de otros molinos de bolas de laboratorio en cuanto a sus características, en primer lugar, la capacidad mínima del molino, siendo de al menos 3 kg, lo sitúa en una categoría de molinos de laboratorio de tamaño medio a grande, lo que lo hace adecuado para procesar cantidades significativas de material. Este nivel de capacidad es crucial en aplicaciones mineras donde se manejan volúmenes considerables de mineral para la evaluación de procesos metalúrgicos. La ventaja de esta capacidad radica en la eficiencia del procesamiento, permitiendo realizar pruebas con muestras representativas y obtener resultados más precisos en una sola molienda, lo que ahorra tiempo y recursos.

Comparativamente, en el ámbito de sus dimensiones, el molino, con una longitud de 52 cm y un diámetro de 33 cm, exhibe una estructura más robusta en comparación con los molinos de bolas de laboratorio estándar. Por ejemplo, su tamaño se asemeja al de los molinos de bolas de laboratorio de tamaño medio utilizados en investigaciones metalúrgicas a escala reducida. La ventaja de esta robustez estructural radica en su capacidad para soportar cargas de trabajo más pesadas y prolongadas, lo que garantiza una mayor durabilidad y vida útil del equipo.

Sin embargo, la principal distinción radica en el diseño y la construcción, ya que se encuentra adaptado para soportar las demandas y rigores del procesamiento minero a gran escala. Esto implicó el uso de componentes más resistentes al desgaste y materiales de construcción específicos para resistir las condiciones adversas del entorno minero, como la abrasión y la corrosión, donde la ventaja de esta adaptación es la capacidad del molino para mantener un rendimiento óptimo incluso en condiciones operativas exigentes, garantizando una operación continua y confiable.

CONCLUSIONES

La determinación de la capacidad mínima de molienda del molino de bolas, fijada en 3 kg, se fundamentó en la necesidad de garantizar su eficacia en la manipulación de volúmenes significativos de material mineralizado. El diseño del tambor, elaborado con un tubo de vapor para oleoductos, conocido como API 5L X52, se ideó específicamente para gestionar esta carga con eficiencia. La elección de este material, debido a sus propiedades de resistencia a temperaturas y presiones elevadas, asegura la durabilidad y fiabilidad del equipo durante el proceso de molienda en el laboratorio. Además, la determinación del grosor óptimo del tambor del molino de bolas fue un paso fundamental en su diseño y construcción, en consonancia con los parámetros y variables definidos. Tras un análisis minucioso de las fuerzas generadas durante la molienda, se concluyó que un grosor de 12 mm era el más adecuado desde una perspectiva económica y técnica. El diseño meticuloso de esta parte esencial del molino garantiza su rendimiento óptimo y su capacidad para cumplir con los requisitos de procesamiento de materiales mineralizados en el laboratorio.

La validación del modelo del molino de bolas, utilizando los materiales mineralizados del sur del país como referencia, arrojó resultados prometedores. Los datos obtenidos durante las pruebas confirmaron la capacidad de este diseño para adaptarse y procesar eficazmente los materiales característicos de la región. La masa de bolas de 60.657 kg y el porcentaje de llenado del 26% se ajustaron cuidadosamente para garantizar un proceso de molienda efectivo, consistente y óptimo.

Los resultados de las pruebas de molienda revelaron una relación significativa entre el tiempo de molienda y el tamaño de partícula resultante. Este hallazgo, influenciado por factores como la gradiente, el tamaño inicial del material y la velocidad de rotación del molino de bolas, respaldó la decisión de llevar a cabo el proceso de molienda durante un tiempo específico de 2 horas en el laboratorio. Se observó una mejora en la distribución del tamaño de partícula a lo largo del tiempo de molienda, validando así la eficacia del molino diseñado con un diámetro de 33 cm, largo de 52 cm y una velocidad crítica de 73.125 rpm.

Además, se identificó la importancia de cumplir con las normativas de seguridad y salud ocupacional en entornos industriales. La NOM-011-STPS-200 regula la exposición laboral al ruido, estableciendo que los trabajadores expuestos a niveles de ruido igual o superiores a 85 dB(A) deben contar con equipo de protección personal auditiva, según lo estipulado en la NOM-017-STPS-1993, la cual es aplicable en razón de que el nivel máximo de decibeles medidos durante la

molienda alcanzó los 93.28 DB. La implementación de estas medidas en el diseño y operación del molino de bolas asegura un entorno laboral seguro y cumple con los estándares de salud y seguridad establecidos.

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento a la Universidad Nacional de Loja en la carrera de Ingeniería en Minas, en cuyos laboratorios se pudo realizar la presente investigación.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: HCG y SC; metodología: HCG; análisis formal: JRS; investigación: OEL; recursos: SC; curación de datos: OEL y JRS; redacción — preparación del borrador original: SC; redacción — revisión y edición: OEL, HCG, SC; visualización: JRS; supervisión: HCG y OEL; administración de proyecto: HCG; adquisición de financiamiento para la investigación: SC y JRS. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito. Hernán Castillo-García: HCG. Stive Cajas: SC. Oscar Estrella-Lima: OEL. Julio Romero-Sigcho: JRS

FINANCIAMIENTO

El presente estudio fue elaborado con fondos propios de los autores.

REFERENCIAS

- Alcántara Vallares, J. R. (2008). *Diseño práctico de un molino de bolas*. [Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica]. Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de. Obtenido de Repositorio studocu <https://n9.cl/hxnro>
- Amores Balseca, E., & Maldonado Bernabé, C. (2019). *Diseño y construcción de un molino de bolas planetario para el laboratorio de materiales de la carrera de ingeniería mecánica*. [Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica]. Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Técnica de Ambato. URL: <https://n9.cl/rbkav>
- Blanco, E. A. (2014). *BLOQUE II-CAPÍTULO 8. MOLIENDA*. [Archivo PDF]. Obtenido de URL: <https://n9.cl/uw4yk>
- Bravo Galvéz, A. C. (2003). *Empresa minera Yauliyacu S.A. planta concentradora: Manúal de molienda y clasificación*. Casapalca, Perú.
- C. Mora, M. (29 de Julio de 2022). Obtenido de http://www.mecapedia.uji.es/pages/correa_rapezoidal.html
- Cabezas Casco, E. A. (2017). *Diseño y construcción de un molino de bolas para aplicaciones de pulvimetalurgia en los laboratorios de ingeniería mecánica de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato*. [Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica]. Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Técnica de Ambato. URL: <https://n9.cl/qa6iw>

- Cevallos Villavicencio, C. R., & Caiza López, D. P. (2019). *Diseño y construcción de un molino de bolas, a escala de laboratorio, para la pulverización de arcillas utilizadas en trabajos de cerámica*. [Trabajo de grado, Ingeniería Electromecánica]. Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga. Obtenido de Repositorio de la Universidad Técnica del Cotopaxi: <https://n9.cl/31dgy>
- Collection, G. (2015). *Molino de bolas para moler grandes rocas de mineral de cobre, erdenet Mining Corporation emc, erdenet, mina de cobre erdenet, Mongolia*. [Fotografía]. Alamy. Obtenido de <https://n9.cl/g61ps>
- Cornejo Aguiar, P. I. (2016). *Depósitos minerales no metálicos del Ecuador*. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/317613312>
- Dana, J. D., Hurlbut, C. S., & Klein, C. (1981). *Manual de mineralogía* (Segunda ed.). Buenos Aires, Barcelona.
- David. (28 de Junio de 2016). *Molienda*. Obtenido de 911 Metallurgist: <https://n9.cl/iuscz>
- Dobrovolski, V. (1980). *Elementos de máquinas* (Tercera ed.). (Mir, Ed., & J. Puig Torres, Trad.) Moscú, Rusia: Mir.
- E. Montes, D. (23 de Junio de 2023). Scribd. Obtenido de *Curva de Rosin-Rammler*: <https://es.scribd.com/document/621413723/Curva-de-Rosin-Rammler-1612971386>
- Energosteel. (05 de diciembre de 2022). Obtenido de *Conceptos generales de Molienda*: <https://n9.cl/l0z6v>
- Espinosa de Leon, L., & Lopez Aburto, V. (s.f). *Teoría y Practicas de trituración y molienda*. (D. d. tierra., Ed.) Obtenido de <https://n9.cl/euokh>
- Facebook. (s.f). *Partes principales de un molino de bolas*. [Página de Facebook]. Facebook, recuperado el 11 de junio de 2020. Obtenido de <https://n9.cl/oku6n>
- Falcon Chura, J. D. (14 de abril de 2021). *Molino de bolas*. Obtenido de FLIPHTML5: <https://n9.cl/tea30>
- Huaman Calzada, P. (2015). *Evaluación de parámetros para el diseño de un molino de bolas en la empresa administradora Cerro S.A.C - Pasco - 2015*. [Trabajo de grado, Ingeniería en Metalurgia]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Obtenido de Repositorio Scrib. URL: <https://n9.cl/90f2>
- Luisa. (28 de Junio de 2020). *Fundamentos de la Conminución*. Obtenido de SCRIB: <https://n9.cl/nztox>
- Méndez Andrade, J., & Orellana Chiriboga, A. (2018). *Diseño y construcción de un molino de martillos triturador de 15 qq/h de mineral pétreo para producir biofertilizantes*. [Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica]. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Politécnica Salesiana. URL: <https://n9.cl/bm49s>
- Ochoa, Y. (7 de Julio de 2020). *Teorías clásicas de la conminución*. Obtenido de SCRIB: <https://n9.cl/yon9s>
- Ortiz Ríos, C. E. (2020). *Molienda de bolas en húmedo y en seco con eje excéntrico externo*. [Trabajo de grado, Ingeniería en Minas y Metalurgia]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Nacional Autónoma de México. URL: <https://n9.cl/if5cd>
- Parra Sumba, P., & Tapia Ruilova, I. (2022). *Análisis de la cinética de molienda entre molino chileno, molino de bolas de la planta de tratamiento FIRSTMETAL y molino SAG a escala de laboratorio, variando el porcentaje de humedad*. [Trabajo de grado, Ingeniería en Minas]. Universidad del Azuay, Cuenca. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad del Azuay. URL: <https://n9.cl/frcqm>
- Piqueras Yepes, V. (2023). *Velocidad crítica de giro de un molino de bolas*. Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2023/01/27/velocidad-critica-de-giro-de-un-molino-de-bolas/>
- Rodríguez, Y., & Almonte Gómez, E. (2021). *Diseño y construcción de un molino de bolas para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña*. [Trabajo de grado, Ingeniería Química]. Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña. URL: <https://n9.cl/xjafq>
- Rojas Heredia, D., & Coro Serrano, A. (2018). *Evaluación de desgaste de medios molidores de acero en un molino de bolas de laboratorio*. [Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica]. Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Politécnica Salesiana. URL: <https://n9.cl/p1d3k>
- Sandoval Pozo, E. (2019). *Diseño y construcción de un molino de bolas a pequeña escala para la obtención de finos de mineral a partir de un desecho industrial*. [Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica]. Universidad Técnica de Machala. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Técnica de Machala. URL: <https://n9.cl/zutmm>
- Sheffield, R. (25 de Octubre de 2021). *Maintenance And Troubleshooting Of Horizontal Ball Mills: Industrial Revolution And Hamming Mill*. Obtenido de <https://n9.cl/x4m9p>
- Steiner, P. (19 de Septiembre de 2012). *What is a ball mill used for?* Obtenido de Hunker: <https://n9.cl/10vn3>
- Tapia, S. A. (2015). *Molinos De Bolas*. [Trabajo de grado]. Universidad de Chile. Obtenido de <https://n9.cl/9eih3>
- Valero Peña, C., & García, C. A. (2017). *Efecto del tiempo de molienda en la distribución de tamaño de partícula en mezclas de Cu-Ni obtenidas por aleación mecánica*. [Trabajo de grado]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Obtenido de <https://n9.cl/9zxb7>
- Vallejo Granados, F., & Sarmiento Sánchez, C. (2022). *Diseño y construcción de un molino de bolas para pulverizar muestras geológicas en el laboratorio de minería de la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, periodo 2021-2022*. [Trabajo de grado, Ingeniería en Minas]. Universidad Central del Ecuador, Quito. Obtenido de <https://n9.cl/qnsae>