



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería en Minas

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

**Trabajo de Integración
Curricular previo, a la
obtención del título de
Ingeniero en Minas**

AUTOR:

Stive Israel Cajas Pérez

DIRECTOR:

Ing. Hernán Luis Castillo García. Ph. D.

Loja – Ecuador

2024

Certificación

Loja, 24 de junio de 2024

Ing. Hernán Luis Castillo García. Ph. D.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

C E R T I F I C O:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño de un molino de bolas con la finalidad de realizar pruebas de molienda del material mineralizado proveniente de la región Sur del Ecuador**. previo a la obtención del título de **Ingeniero en Minas**, de la autoría del estudiante **Stive Israel Cajas Pérez** con cedula Nro.**1105684532**. una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Ing. Hernán Luis Castillo García

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACION CURRICULAR

Autoría

Yo, **Stive Israel Cajas Pérez**, declaro ser autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración curricular, en el repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma: 

Cédula de identidad: 1105684532

Fecha: 24/06/2024

Correo electrónico: stive.cajas@unl.edu.ec

Teléfono: 0985042006

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total, y/o publicación electrónica del texto completo del Trabajo de Integración Curricular

Yo, **Stive Israel Cajas Pérez**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño de un molino de bolas con la finalidad de realizar pruebas de molienda del material mineralizado proveniente de la región Sur del Ecuador**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero en Minas**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional. Los usuarios pueden consultar el contenido de ese trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los veinticuatro días del mes de junio del dos mil veinticuatro.

Firma: 

Cédula de identidad: 1105684532

Dirección: Loja, Ecuador

Correo electrónico: stive.cajas@unl.edu.ec

Teléfono: 0985042006

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de Integración Curricular: Ing. Hernán Luis Castillo García Ph. D.

Dedicatoria

Dedicado a mis queridos Padres, Wilson Alexander Cajas y María Teresa Pérez, y Hermano, Galo Alexander Cajas,

Este logro académico no habría sido posible sin su amor, apoyo y sacrificio incondicional a lo largo de este arduo viaje universitario. Sus palabras de aliento, sabios consejos y constante presencia han sido mi mayor inspiración y motivación para perseguir la excelencia en mis estudios. A ti mi angelito María Emilia que pese a no estar aquí con nosotros sigues siendo mi motor para ser mejor cada día porque sé, que me estas cuidando a lo lejos.

A mi pareja, María de los Ángeles

Tu amor y comprensión han sido mi ancla en los momentos de estrés y desafío. Tu apoyo incondicional y tu fe en mí han sido el impulso que necesitaba para alcanzar esta meta académica. Este trabajo está dedicado a ustedes, como un humilde tributo a su inmenso impacto en mi vida y en mi educación. Cada página de esta tesis lleva consigo su amor, sabiduría y aliento, y les estaré eternamente agradecido por ser mi roca y mi luz en este viaje universitario.

Con profundo amor y gratitud.

Stive Israel Cajas Pérez

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Hernán Luis Castillo García, director del trabajo de integración curricular, por su dedicación, orientación y apoyo durante todo el proceso de investigación y redacción de esta tesis. Su experiencia y sabiduría fueron fundamentales para dar forma a mis ideas y transformarlas en este trabajo académico.

También quiero extender mi agradecimiento a la planta docente del Departamento de la facultad de energía y los recursos naturales no renovables de la Carrera de MINAS, por su invaluable contribución a mi formación académica. Sus enseñanzas, mentoría y comentarios constructivos han enriquecido mi experiencia universitaria y han sido fundamentales para mi crecimiento como estudiante e investigador.

A todos ustedes, les estoy profundamente agradecido por su tiempo, paciencia y compromiso con mi desarrollo académico. Sin su apoyo, esta tesis no habría sido posible. Su influencia perdurará más allá de estas páginas, y por eso les estaré siempre agradecido

Stive Israel Cajas Pérez

Índice de contenidos

PORTADA	I
CERTIFICACIÓN	II
AUTORÍA	III
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VII
ÍNDICE DE TABLAS:.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS:.....	IX
ÍNDICE DE ANEXOS:.....	XI
1. TÍTULO	1
2. RESUMEN	2
ABSTRACT	3
3. INTRODUCCIÓN	4
4. MARCO TEÓRICO	6
4.1. CONMINUCIÓN.....	6
4.2. LEYES DE LA CONMINUCIÓN.....	7
4.2.1. Primera ley de la conminución.....	7
4.2.2. Segunda ley de la conminución.....	8
4.2.3. Tercera ley de la conminución.....	9
4.3. PRUEBAS DE LABORATORIO CONMINUCIÓN.....	10
4.4. MOLIENDA GENERALIDADES.....	11
4.4.1. Mecanismos de Molienda.....	13
4.5. TIPOS DE FRACTURA EN MOLIENDA.....	14
4.5.1. Abrasión.....	14
4.5.2. Impacto.....	14
4.5.3. Cizalle y fricción.....	14
4.5.4. Compresión.....	14
4.6. CINÉTICA DE MOLIENDA.....	15
4.7. RELACIÓN ENTRE ELEMENTOS Y VARIABLES EN MOLIENDA.....	15
4.8. MOLINOS.....	15
4.9. MOLINO DE BOLAS.....	16
4.9.1. Tipos de molinos de bolas.....	18
4.10. PARTES DE UN MOLINO DE BOLAS.....	19
4.10.1. Funcionamiento de los molinos de bolas.....	20
4.10.2. Parámetros de diseño del Molino de bolas.....	20
4.11. VARIABLES DE OPERACIÓN DE LOS MOLINOS DE BOLAS.....	21
4.11.1. Fracción de llenado.....	21
4.11.2. Carga de medios moledores.....	21
4.11.3. Velocidad de Giro.....	22
4.11.4. Velocidad Crítica.....	23
4.11.5. Potencia.....	24
4.11.6. Tamaño Máximo de bolas de acero.....	24
4.11.7. Carga de Medios de molienda.....	24
4.12. VARIABLES Y PARÁMETROS FÍSICO-MECÁNICOS.....	25
4.12.1. Diseño del tambor.....	25
4.12.2. Espesor del tambor.....	26
4.12.3. Dimensión de las tapas del tambor.....	27
4.12.4. Tipo de transmisión.....	27

4.12.5.	Funcionamiento de un molino de bolas	27
4.13.	DESCRIPCIÓN DE MOLINO DE BOLAS A TOMAR EN CUENTA PARA EL DISEÑO	28
4.13.1.	Molino de bolas de la Universidad Técnica Particular de Loja	28
4.13.2.	Molino de bolas de compartimientos múltiples	30
5.	METODOLOGÍA	31
5.1.	ÁREA DE ESTUDIO.....	31
5.2.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	31
5.3.	MATERIALES.....	32
5.4.	PROCEDIMIENTO	33
5.5.	METODOLOGÍA PARA EL PRIMER OBJETIVO.....	34
5.5.1.	Recolección de información, variables y características.....	34
5.5.2.	Determinación de las variables y parámetros claves.....	35
5.5.3.	Selección de materiales.....	35
5.5.4.	Diseño y dimensionamiento del molino de bolas.....	36
5.5.5.	Cálculo modelado de parámetros y variables.....	36
5.6.	METODOLOGÍA PARA EL SEGUNDO OBJETIVO	38
5.6.1.	Selección y lista de componentes para la construcción.....	38
5.6.2.	Organización y verificación de componentes	39
5.6.3.	Montaje, integración y calibración.....	39
5.7.	METODOLOGÍA PARA EL TERCER OBJETIVO	39
5.7.1.	Caracterización de las muestras provenientes de la región sur	39
5.7.2.	Trabajos previos para la identificación de las propiedades índice	40
5.7.3.	Preparación de las muestras para las pruebas de molienda	43
5.7.4.	Procedimiento de Rosin-Rammler (Distribución de tamaños).....	45
5.7.5.	Preparación para las pruebas de molienda	46
5.7.6.	Descripción de los ensayos realizados	49
6.	RESULTADOS.....	54
6.1.	RESULTADOS DEL PRIMER OBJETIVO.....	54
6.1.1.	Cálculos de las variables, parámetros y características.....	54
6.1.2.	Selección de la transmisión.....	61
6.1.3.	Análisis y Justificación de la transmisión	62
6.2.	RESULTADOS DEL SEGUNDO OBJETIVO	72
6.2.1.	Diseño y construcción del molino de bolas.....	72
6.2.2.	Diseño en software Solidwoks y Molino de bolas construido	79
6.3.	RESULTADOS DEL TERCER OBJETIVO	80
6.3.1.	Descripción de las muestras	80
6.3.2.	Resultados obtenidos de las propiedades índice de las muestras.....	81
6.3.3.	Granulometría de Rosin-Rammler previo a la molienda.....	83
6.3.4.	Inspección y Preparación del molino.....	86
6.3.5.	Inicio del proceso de molienda.....	87
6.3.6.	Ensayos de eficiencia de molienda, distribución de tamaños (granulométrico) y medición de ruido.....	88
7.	DISCUSIÓN.....	99
8.	CONCLUSIONES.....	102
9.	RECOMENDACIONES.....	104
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	106
11.	ANEXOS	109

Índice de Tablas:

Tabla 1.	Ventajas y desventajas de los tipos de molinos	18
Tabla 2.	Laboratorio de la universidad nacional de loja	31
Tabla 3.	Materiales gabinete y de campo	32
Tabla 4.	Materiales de laboratorio	32
Tabla 5.	Materiales de taller	32
Tabla 6.	Fórmulas relevantes	36
Tabla 7.	Lista de componentes	38
Tabla 8.	Propiedades índices de las rocas	40
Tabla 9.	Muestras mineralizadas representativas	40
Tabla 10.	Rosin-Rammler	44
Tabla 11.	Condiciones experimentales para ensayos de validación	53
Tabla 12.	Cálculo DK	58
Tabla 13.	Datos generales del molino	59
Tabla 14.	Gradiente para el molino de bolas	59
Tabla 15.	Relación entre elementos y su peso	60
Tabla 16.	Datos generales muestra 1	80
Tabla 17.	Datos generales muestra 2	80
Tabla 18.	Datos generales muestra 3	80
Tabla 19.	Datos obtenidos para el cálculo de las propiedades índice de las muestras	81
Tabla 20.	Propiedades índices de la muestra 1 chinapinza	81
Tabla 21.	Propiedades índices de la muestra 2 torata	81
Tabla 22.	Propiedades índice muestra 3 santa isabel	82
Tabla 23.	Ejemplo humedad/reducción de tamaño	83
Tabla 24.	Resultados del tamizaje chinapinza	83
Tabla 25.	Resultados del tamizaje torata	84
Tabla 26.	Resultados del tamizaje santa isabel	84
Tabla 27.	Pesos iniciales previo a la molienda	87
Tabla 28.	Pesos de muestras	88
Tabla 29.	Condiciones experimentales para ensayos de validación	88
Tabla 30.	Energía de bond para santa isabel	90
Tabla 31.	Energía de bond para torata	91
Tabla 32.	Energía de bond para chinapinza	91
Tabla 33.	Análisis granulométrico de santa isabel 1 hora de molienda	92
Tabla 34.	Análisis granulométrico de torata 1 hora 30 minutos de molienda	93
Tabla 35.	Análisis granulométrico de chinapinza 2 horas de molienda	94

Índice de Figuras:

Figura 1.	Mecanismos de fractura	6
Figura 2.	Ecuación de rittinger	8
Figura 3.	Molino de bolas para moler grandes rocas de mineral	12
Figura 4.	Abrasión	13

Figura 5.	Atricción.....	13
Figura 6.	Impacto.....	13
Figura 7.	Tipos de fractura en molienda.....	14
Figura 8.	Relación entre elementos y variables	15
Figura 9.	Tipos de molinos	16
Figura 10.	Molino de bolas.....	17
Figura 11.	Tipos de descarga del molino de bolas.....	17
Figura 12.	Pates de un molino de bolas	20
Figura 13.	Vista de rotación en cascada de un molino de bolas	22
Figura 14.	Representación de los dos tipos de movimiento.....	23
Figura 15.	Relación entre elementos y variables	26
Figura 16.	Tipos de descarga del molino de bolas.....	28
Figura 17.	Tipos de descarga del molino de bolas.....	30
Figura 18.	Peso sumergido	41
Figura 19.	Trituración de muestras para picnómetro.....	41
Figura 20.	Muestras pasante malla #200	42
Figura 21.	Introducción de la muestra al picnómetro	42
Figura 22.	Peso de muestras picnómetro	43
Figura 23.	Peso de muestras trituradas	44
Figura 24.	Cuarteo del material	45
Figura 25.	Tamizador eléctrico.....	46
Figura 26.	Tambor.....	55
Figura 27.	Tambor y espesor	56
Figura 28.	Tapa de tambor.....	57
Figura 29.	Grado de llenado	57
Figura 30.	Variables interiores del molino	58
Figura 31.	Motor.....	59
Figura 32.	Diseño de transmisión	62
Figura 33.	Diagrama cinemático de velocidad crítica del molino	63
Figura 34.	Diagrama para cálculo del torque máximo	66
Figura 35.	Factor de servicio utilizado en molino de bolas.....	67
Figura 36.	Diagrama de la transmisión.....	68
Figura 37.	Diagrama cinemático del área de la banda o correa trapezoidal	70
Figura 38.	Cámara de molienda.....	72
Figura 39.	Cámara de molienda diseño final	73
Figura 40.	Ejes y tapas del cilindro	73
Figura 41.	Ejes y cámaras de molienda	74
Figura 42.	Seguro del molino	75
Figura 43.	Mesa de tubo cuadrado.....	75
Figura 44.	Polea principal y montaje de la cámara de molienda	76
Figura 45.	Polea secundaria.....	77
Figura 46.	Base del motor y montaje de la polea	77
Figura 47.	Montaje del motor y la botonera	78
Figura 48.	Tolva con bandeja para la caída del material	79

Figura 49.	Diseño del molino de bolas en software solidworks	79
Figura 50.	Diseño del molino de bolas en software solidworks	79
Figura 51.	Molino de bolas.....	79
Figura 52.	Granulometría trituración p80 de chinapinza rosin-rammler	85
Figura 53.	Granulometría trituración p80 de torata rosin-rammler	85
Figura 54.	Granulometría trituración p80 de santa isabel rosin-rammler	86
Figura 55.	Materiales indispensables.....	87
Figura 56.	Gradiente del medio moedor.....	88
Figura 57.	Secado del material molido.....	90
Figura 58.	Pequeña fracción del material pasante malla 200	90
Figura 59.	Tipo de proceso en relación al tamaño de salida de partícula	92
Figura 60.	Distribución de tamaños p80 121.6 micras	92
Figura 61.	Distribución de tamaños p80 98.4 micras	93
Figura 62.	Distribución de tamaños p80 72.8 micras	94
Figura 63.	Distribución granulométrica en relación al tiempo de molienda.....	95
Figura 64.	Gráfico de curva en relación al tiempo y la granulometría	95
Figura 65.	Especificaciones sonómetro extech 407750.....	96
Figura 66.	Descripción partes del sonómetro	96
Figura 67.	Gráfica de máximos y mínimos por medio del sonómetro	97
Figura 68.	Epp auditiva para molienda.....	98

Índice de Anexos:

Anexo 1.	Diseño de la estructura de la mesa para el soporte del cilindro.....	109
Anexo 2.	Diseño de la cámara de molienda.....	110
Anexo 3.	Diseño del motor que se empleó	110
Anexo 4.	Diseño de poleas con sus diferentes diámetros	111
Anexo 5.	Diseño base del motor.....	114
Anexo 6.	Perno templador	115
Anexo 7.	Chumaceras	116
Anexo 8.	Sistema de sellado del molino.....	117
Anexo 9.	Diseño final del molino	119
Anexo 10.	Etapa constructiva	120
Anexo 11.	Materiales indispensables para llevar a cabo la molienda.....	127
Anexo 12.	Logo personal del molino de bolas	128
Anexo 13.	Certificación de traducción del resumen	129

1. Título

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

2. Resumen

El presente Trabajo de Integración Curricular, titulado "Diseño de un molino de bolas con la finalidad de realizar pruebas de molienda del material mineralizado proveniente de la región Sur del Ecuador", se enfoca en el desarrollo de un equipo de laboratorio adecuado para llevar a cabo pruebas de molienda con el material mineralizado de la región. 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 UNL, utilizando tres muestras provenientes de distintas localidades (Chinapinza, Torata, Santa Isabel), las cuales 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: *Molino de bolas, Molienda, Material mineralizado, Región Sur del Ecuador, Medición de ruido.*

Abstract

At the beginning of the milling process, the material was weighed and introduced into the ball mill along with a specified gradient and a specific percentage of water (1 material / 1 water ratio). Different milling times were established to perform size distribution analysis using the Rosin-Rammler method, which provided information where P80 was 80% of the milled material passing. In addition, a noise measurement test was conducted, revealing that the equipment should be located in an enclosed room or an isolated area due to the acoustic contamination it generates.

It is recommended to use earplugs and a mask as Personal Protective Equipment (PPE).

The results obtained indicate that the mill may reach a satisfactory grinding efficiency in two hours. However, it is advised to use a broader media size gradient and ensure strict quality control process and guarantee the caliber of the output. These measures will help improve the durability, efficiency, and consistency of the grinding process, which will positively impact the university laboratory as well contributing to economic and professional development in the mining sector.

Keywords: *Ball mill design, Grinding, Mineralized material, Southern region of Ecuador, Noise measurement.*

3. Introducción

La industria minera, depende en gran medida de la eficacia y precisión de los procesos de conminución y molienda de minerales. Estas operaciones son fundamentales para la extracción y procesamiento de minerales valiosos, lo que contribuye significativamente al desarrollo económico y social de la región. Sin embargo, la diversidad de materiales mineralizados presentes en esta área geográfica plantea desafíos únicos en términos de diseño y operación de equipos de molienda.

“Se tiene en cuenta que la conminución es un proceso esencial en la industria minera, donde se produce la reducción de tamaño de las partículas de mineral, mediante trituración y/o molienda, además” (Zumaran, 2017).

En este contexto, surge la necesidad de diseñar un molino de bolas adaptado a las características específicas del laboratorio para realizar pruebas con los materiales mineralizados del Sur del Ecuador. Este proyecto de investigación propone abordar esta necesidad, enfocándose en la elaboración de un diseño de molino de bolas que pueda llevar a cabo pruebas de molienda de manera eficiente y precisa con los materiales disponibles en la región.

El objetivo radica en desarrollar un diseño de molino de bolas que tome en consideración las variables, parámetros y condiciones inherentes a los materiales mineralizados del Sur del país, para lo cual se deben llevar a cabo diversas etapas de investigación y desarrollo, cada una destinada a abordar aspectos específicos del proceso de diseño, construcción, prueba y validación del equipo de laboratorio.

Todo inicia con una identificación y análisis meticuloso de las condiciones de operación requeridas para la molienda eficiente. Este análisis servirá como base para definir las variables, parámetros y características que influirán en el diseño del molino de bolas en el Laboratorio de la Carrera de Minas.

En el ámbito del procesamiento de minerales, como en la cianuración, flotación, concentración de gravedad y amalgamación, es imprescindible llevar a cabo las etapas de chancado y molienda, utilizando comúnmente molinos de barras y de bolas, para liberar los minerales contenidos en las rocas. En la industria química y otras industrias de procesamiento, la molienda representa un paso crítico previo al tratamiento subsiguiente. A lo largo de muchos años, diversas

máquinas de molienda fina han sido desarrolladas y empleadas, pero el molino de bolas se ha establecido como la opción estándar debido a su sencillez y bajo costo operativo. (David, 2016)

Una vez definidos estos aspectos, se procederá a la construcción del molino de bolas, utilizando los datos obtenidos en la etapa anterior como guía para el diseño y la construcción del equipo. Se prestará especial atención a aspectos como la resistencia estructural, la durabilidad y la facilidad de mantenimiento del equipo, con el fin de garantizar su funcionamiento óptimo en condiciones de laboratorio.

Finalmente, se llevará a cabo la validación del modelo del molino de bolas, mediante pruebas experimentales que permitan evaluar su rendimiento en condiciones reales de operación. Estas pruebas se realizarán utilizando materiales mineralizados de la región Sur del país, con el fin de verificar la capacidad del equipo para moler eficientemente dichos materiales y proporcionar resultados precisos y confiables.

Objetivos:

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.
- Validación del modelo tomando como base los materiales mineralizados de la región Sur del país.

4. Marco Teórico

4.1. Conminución

La conminución es un proceso fundamental que se utiliza para reducir el tamaño de los minerales extraídos de la tierra, cuyo objetivo principal es liberar los minerales valiosos de la roca y prepararlos para su posterior procesamiento y recuperación.

Entorno al conocimiento, (Zumaran, 2017) afirma que:

La conminución es el proceso a través del cual se produce la reducción de tamaño de las partículas de mineral, mediante trituración y/o molienda, con el fin de:

- Liberar especies diseminadas.
- Facilitar el manejo de los sólidos.
- Obtener un material de tamaño apropiado y controlado.

El resultado de la conminución es medido a través de la razón de reducción:

$$Rr = \frac{\text{Tamaño del Alimento}}{\text{Tamaño del producto}} = \frac{F80}{P80}$$

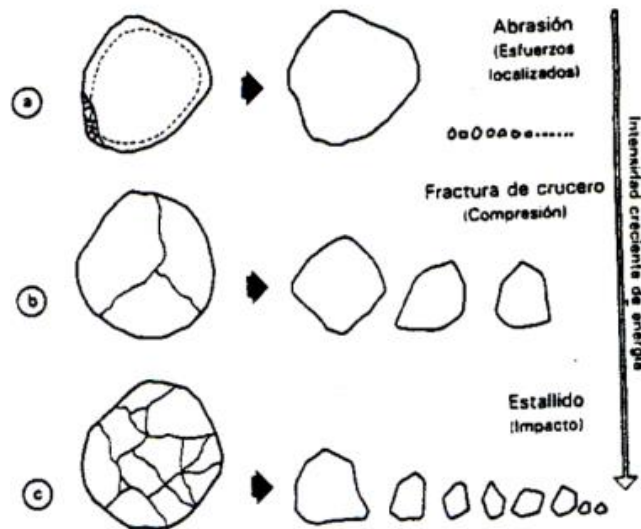


Figura 1. Mecanismos de fractura
Nota. (Zumaran, 2017)

La eficiencia de la conminución en la minería es crucial, ya que tiene un impacto directo en la rentabilidad de la operación. Una conminución eficiente permite una liberación adecuada de los minerales valiosos y reduce la generación de partículas finas innecesarias. Esto se logra a través de la selección adecuada de los equipos de conminución, la optimización de los circuitos de

conminución y el control de los parámetros de operación, como la velocidad de alimentación y la carga de medios de molienda.

En palabras de (Rojas, 2018) sostiene que:

En el proceso de conminución, el parámetro clave a optimizar es la energía requerida para reducir el tamaño y la granulometría del material en cada etapa. La energía consumida en este proceso se distribuye en diversas formas:

- Deformaciones elásticas de las partículas
- Deformaciones plásticas de las partículas antes de llegar a la fractura
- Fricción entre las partículas
- Vencer la inercia entre las piezas de la máquina
- Deformaciones elásticas de la máquina
- Producción de ruido, calor y vibración de la instalación
- Contacto entre las partículas y las piezas de la máquina
- Pérdidas de eficiencia en la transmisión de energía eléctrica y mecánica

4.2.Leyes de la Conminución

Las leyes de la conminución son principios fundamentales que rigen el proceso de reducción de tamaño de los minerales en la industria minera. Estas leyes, basadas en observaciones y análisis científicos, proporcionan una comprensión objetiva de cómo varía el tamaño de las partículas en función de la energía aplicada durante la conminución. Dos de las leyes más reconocidas en este contexto son la Ley de Rittinger y la Ley de Kick.

4.2.1. Primera ley de la conminución

Ecuación de Rittinger - Von Rittinger: En 1867 postuló por primera vez una relación entre la energía específica consumida y el incremento de superficie específica generada en las partículas durante la conminución.

$$E_r = K_r (S_p - S_f)$$

Donde:

K_r = constante de Rettinger

S_p = Superficie específica del producto

S_f = Superficie específica de la alimentación. En forma general la superficie específica

$$S = \frac{\text{superficie}}{\text{masa}} = \frac{(\alpha_s)(d^2)}{(\alpha_v)\delta V} = \frac{\alpha_s(d^2)}{(\alpha_v)(\delta)d^3} = \frac{\alpha_s}{(\alpha_v)(\delta)d} = k \left(\frac{1}{d}\right) = Kr \left(\frac{1}{d}\right)$$

$$Er = (Kr) \left(\frac{1}{dp} - \frac{1}{df}\right)$$

Figura 2. Ecuación de Rittinger

Nota: (Ochoa, 2020)

Donde:

α_s = factor forma superficial

α_v = factor de forma volumétrica

δ = densidad

V = volumen

df=tamaño del producto

df=tamaño del alimento. (Ochoa, 2020)

4.2.2. Segunda ley de la conminución

Según (Luisa, 2020) expone que:

Ecuación de Kirk –Kirpichev (1885): indica que “La energía requerida para producir cambios análogos en el tamaño de cuerpos geoméricamente similares, es proporcional al volumen de estos cuerpos.”. Esto implica que una cantidad constante de energía aplicada generará cambios geoméricos equivalentes en el tamaño de un sólido.

Kick, en su análisis, consideró que la energía empleada en la fractura de un cuerpo sólido ideal (que es homogéneo, isotrópico y sin defectos), se limitaba únicamente a la necesaria para deformar el sólido hasta alcanzar su punto de ruptura, sin tener en cuenta la energía adicional requerida para producir la ruptura real del material.

$$Ek = K * \log \left(\frac{F80}{P80}\right)$$

Donde:

Ek= energía específica de Kirk

K= constante

df = tamaño representativo de la alimentación.

tp= tamaño representativo del producto.

4.2.3. Tercera ley de la conminución

Ecuación de F. Bond (1952): Dado que las ecuaciones anteriores no concordaban con los resultados experimentales y debido a la necesidad de una norma estándar en la industria para clasificar los materiales según su respuesta a la conminución, Fred Bond propuso en 1952 una teoría de la conminución. “La energía EB consumida para reducir de tamaños una alimentación de mineral desde un tamaño del 80% passing hasta un producto de tamaño 80% passing es inversamente proporcional a la raíz cuadrada, los tamaños se expresan en micras.

$$Eb = Kb\left(\frac{1}{\sqrt{dp}} - \frac{1}{\sqrt{df}}\right)$$

Donde:

Eb= Consumo de energía específica (Kw-h/TC) de acuerdo a la teoría de F. Bond.

Kb= Parámetro de Bond.

dP = Tamaño del 80% passing del producto en micras.

dF = Tamaño del 80% passing de la alimentación en micras (Ochoa, 2020).

Bond estableció el parámetro KB en relación con el Work Index WI (índice de trabajo del material), el cual representa el trabajo total requerido (medido en [kWh/tonelada corta]), para reducir una tonelada corta de material desde un tamaño inicial teóricamente infinito hasta partículas en las que aproximadamente un 80% sea inferior a 100 [μ m] (equivalente a aproximadamente un 67% en malla 200#) (Luisa, 2020).

$$Eb = W = Wi\left(\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}}\right)$$

Donde:

W representa el Consumo de Energía Específica en kilovatios-hora por tonelada corta (kWh/TC).

Esta ecuación ha demostrado ajustarse a los datos de granulometría y consumo de potencia en el chancado grueso y la molienda, lo que la hace aplicable a nivel industrial.

Fred Bond ha desarrollado el equipo y el método estándar para calcular el valor del Work Index (índice de trabajo) para una muestra de mineral, lo que facilita la selección de chancadoras y molinos convencionales (como molinos de bolas y molinos de barras) de manera precisa y confiable (Ochoa, 2020).

4.3. Pruebas de laboratorio Conminución

Según (Salazar, 2014), expone que:

Existen varias pruebas de laboratorio para evaluación de la conminución. Algunas de ellas son:

Prueba SMC (Small-Scale Mining Comminution): Esta prueba se utiliza para la evaluación del tamaño de partícula y la energía requerida para la trituración, molienda y aglomeración de minerales. El objetivo de la Prueba SMC es proporcionar información relevante y confiable sobre el rendimiento de la conminución en condiciones similares a las operaciones reales, pero en una escala reducida y con un menor costo.

La Prueba SMC es una herramienta valiosa para los pequeños productores mineros, ya que les permite tomar decisiones informadas sobre el diseño y la operación de sus sistemas de conminución. Al obtener información precisa sobre la eficiencia de la conminución, pueden optimizar sus procesos y mejorar la recuperación de minerales valiosos, lo que contribuye a la rentabilidad y sostenibilidad de sus operaciones.

Prueba JK Drop Weight: Es una prueba de impacto que mide el nivel de resistencia del mineral a la fractura bajo condiciones controladas, y ayuda a determinar la energía y las condiciones óptimas para la etapa de conminución. Se utiliza un dispositivo especialmente diseñado conocido como "drop weight tester" (probador de peso caído). El procedimiento implica soltar un peso o masa desde una altura determinada para que impacte sobre una muestra de mineral, contenida en un cilindro cerrado. La energía del impacto provoca la fractura de la muestra en partículas más pequeñas, y se mide la energía absorbida durante este proceso.

Con los datos obtenidos de la Prueba JK Drop Weight, se calcula el índice de trabajo A_{xb} (JK Drop Weight Index), que es una medida de la resistencia al impacto del mineral. El índice A_{xb} se utiliza junto con otros parámetros, como el índice de trabajo JK Bond (WI) y el tamaño característico de la alimentación (F80), para modelar y simular la eficiencia de los circuitos de molienda. Esto permite a los ingenieros optimizar el diseño y operación de los molinos, así como seleccionar el equipo adecuado para lograr un procesamiento más eficiente y rentable de los minerales.

Prueba de índice de trabajo de Bond: Esta prueba mide la energía necesaria para moler un mineral en condiciones específicas y se utiliza para la selección de equipos de conminución y

diseño de circuitos. Durante la Prueba de Bond, se prepara una muestra representativa del mineral en un rango de tamaños de partícula definidos.

Esta muestra se somete a una serie de ciclos de trituración y molienda en un molino de laboratorio específico, denominado Molino de Bond.

En cada ciclo, se mide la energía necesaria para reducir el tamaño del mineral hasta un tamaño final predeterminado. El Índice de Trabajo de Bond (WI) es una medida de la resistencia del mineral a la conminución, específicamente a la trituración y la molienda.

Prueba de molino piloto: Esta prueba involucra la operación de un molino piloto con muestras de mineral en condiciones similares a las que se encuentran en la práctica industrial y se utiliza para la selección de equipos y diseño de circuitos de conminución.

El objetivo es proporcionar información precisa y confiable sobre cómo el mineral se comportará en un equipo de molienda industrial a una escala reducida.

Esto permite a los ingenieros evaluar y optimizar el rendimiento del molino, determinar el tamaño y tipo adecuado de equipo para las operaciones reales, y predecir la eficiencia del procesamiento de minerales en la planta.

4.4.Molienda Generalidades

La molienda es conocido como un proceso utilizado para reducir el tamaño de las partículas de los minerales o materiales extraídos y el trabajo donde hay mayor consumo energético, esta operación consiste en la trituración y pulverización de los minerales o materiales para obtener partículas más pequeñas y así facilitar su posterior tratamiento.

La molienda es un proceso esencial en el cual se disminuye el tamaño promedio de las partículas de un sólido, logrando dividir o fragmentar la muestra mediante mecanismos mecánicos hasta alcanzar el tamaño deseado. Entre los métodos más utilizados para reducir el tamaño en las máquinas de molienda se encuentran la compresión, el impacto, la fricción por cizallamiento y el corte (Rodríguez y Almonte, 2021).



Figura 3. Molino de bolas para moler grandes rocas de mineral
Nota. (GFC, 2015)

La molienda se desarrolla a través de maquinaria conocida como molinos, los cuales pueden operar en húmedo (pulpas) o en seco. La molienda húmeda se caracteriza por unos elevados porcentajes de humedad (del 40% al 70 %), lo que provoca, como principal característica, que el material que ingresa posea una notable adherencia y un consumo menor de energía, debido a que la humedad disminuye la resistencia de los fragmentos del material, dentro de los equipos de molienda. Se trabaja en seco cuando la humedad es menor al 8 % (humedad superficial), prefiriendo que la humedad no sobrepase del 3% al 4 % (Blanco, 2014).

Según lo estudiado la molienda se realiza mediante equipos antes mencionados, que pueden ser de distintos tipos, como molinos de bolas, molinos de barras, molinos semiautógenos (SAG) o molinos autógenos, donde estos molinos utilizan la fuerza del impacto, la compresión o la fricción para reducir el tamaño de las partículas.

Entorno al conocimiento, Espinoza y López (2015) exponen que:

La etapa primaria de la operación de molienda suele llevarse a cabo en molinos de barras, mientras que la etapa secundaria se realiza en molinos de bolas. Por lo general, la descarga de los molinos de barras tiene un tamaño de 991 micras (16 mallas), y en los molinos de bolas se puede alcanzar cualquier tamaño dentro de límites económicos. Para tener alta eficiencia en esta operación, es necesario que los molinos operen en condiciones normales en términos de uniformidad del tamaño de alimentación y dilución de la pulpa, además de cumplir con los siguientes requisitos: velocidad adecuada, carga de bolas óptima y potencia del motor adecuada. (p. 55).

4.4.1. *Mecanismos de Molienda*

Existen varios mecanismos de molienda utilizados en la industria, que se emplean según el tipo de material a moler y el resultado deseado.

Entorno al conocimiento, Amores y Maldonado (2019) afirman que:

Los principales mecanismos de la molienda se lo presentan a continuación:

Abrasión: Se da por la falta de energía necesaria la cual genere una molienda de la partícula adecuada:



Figura 4. *Abrasión*

Nota. (Amores y Maldonado, 2019)

Atrición: Se da cuando las partículas pasan por medio y a la vez actúa la energía necesaria para que dichas partículas lleguen al punto de fractura y así obtengan un tamaño mediano.



Figura 5. *Atrición*

Nota. (Amores y Maldonado, 2019)

Impacto: Se da cuando se utiliza una energía elevada, la cual genera que las partículas no se desintegren uniformemente, al contrario, estas se desintegran diferente con formas y tamaños distintos.

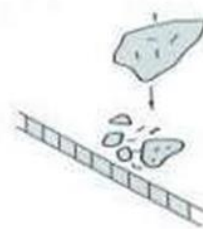


Figura 6. *Impacto*

Nota. (Amores y Maldonado, 2019)

4.5. Tipos de fractura en molienda

En el proceso de molienda, se producen diferentes tipos de fractura en los materiales a medida que son reducidos en tamaño.

Algunos de los tipos de fractura más comunes en la molienda son los siguientes:

4.5.1. *Abrasión*

Esta fractura ocurre cuando la fricción produce un desgaste de las superficies, de esta manera rocas esféricas anteriormente formadas por cizalle, se desgastan a tal punto de formar rocas suaves, similares a los cantos rodados de los ríos.

La abrasión y la cizalle conducen a la producción de material fino, denominando a este efecto, atrición (Austin & Concha, 1994).

4.5.2. *Impacto*

Este fenómeno se produce cuando las bolas de mayor tamaño y algunas partículas de tamaño grande son elevadas por los lifters, adquiriendo energía potencial que luego se convierte en energía cinética.

Como resultado, se produce un impacto significativo que desintegra las partículas. Este proceso ocurre cuando la energía aplicada directamente a la partícula supera el umbral necesario para romper el material (Austin & Concha, 1994).

4.5.3. *Cizalle y fricción*

Cabe destacar que “Este mecanismo provoca que rocas irregulares tiendan a formar partículas aproximadamente esféricas en la molienda autógena” (Austin & Concha, 1994).

4.5.4. *Compresión*

Este tipo de fractura se produce cuando un impacto masivo originado por los medios molidores y material de gran tamaño, desintegra las partículas. Es decir, la energía aplicada directamente sobre la partícula es mayor a la energía requerida para fracturar el material (Austin & Concha, 1994).

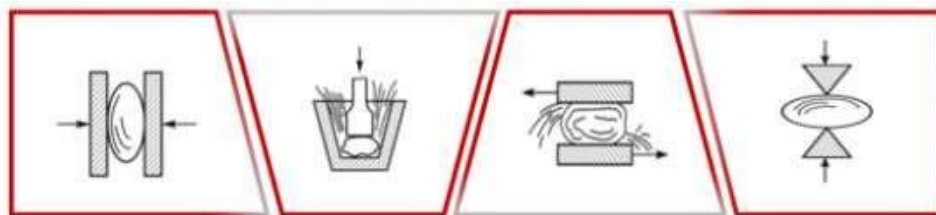


Figura 7. Tipos de fractura en molienda
Nota. (Energosteel, 2022)

4.6. Cinética de Molienda

La cinética de molienda se refiere a cómo cambia la composición granulométrica del material durante el proceso de molienda, es decir, se trata de la forma en que el tamaño grueso disminuye de manera regular. Es crucial comprender esta cinética para orientar la operación de los molinos de bolas y elegir las condiciones de trabajo más eficientes. Por lo tanto, es fundamental conocer cómo se desarrolla este proceso a lo largo del tiempo (Coello, 1993).

4.7. Relación entre elementos y variables en molienda

En el entorno del conocimiento, Cabezas (2017) sostiene que:

Al llevar a cabo la operación de molienda, es fundamental considerar las variables clave, como la velocidad crítica, el diámetro interno del molino y la utilización del medio molidor. Es necesario tener en cuenta que, durante el proceso de molienda, se emplean medios molidores con diferentes diámetros para lograr una eficiente reducción de tamaño del material.

Entre las principales relaciones tenemos:

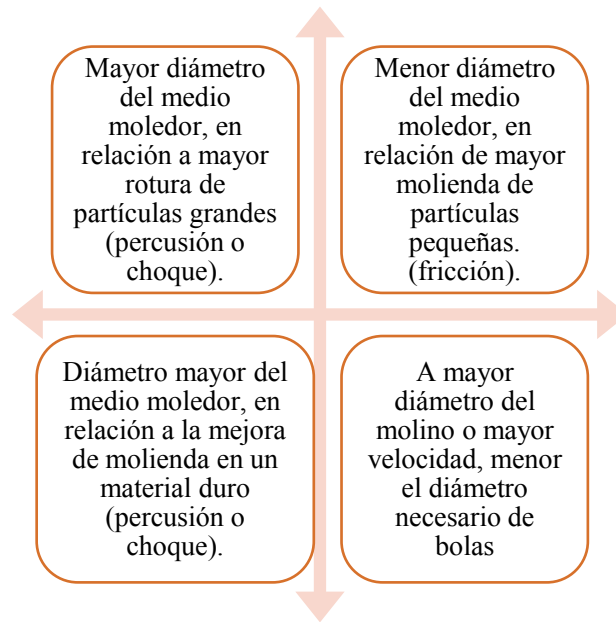


Figura 8. Relación entre elementos y variables
Nota. Elaborado por el autor, tomado de (Cabezas, 2017).

4.8. Molinos

Los molinos son equipos especializados diseñados para la molienda de minerales y materiales de gran dureza.

En palabras de Cárcamo (2003) sostiene que:

Los molinos son grandes cilindros que giran sobre su propio eje y que albergan en su interior una mezcla del material junto con cuerpos moledores. Estos cuerpos permiten desarrollar la operación de conminución y pueden ser, en su gran mayoría, bolas de acero, barras de acero, guijarros, bolas de porcelana y el mismo mineral grueso. Además, el grado de fractura de la carga del molino será determinado por los elementos anteriormente nombrados y la velocidad de rotación del mismo, dado que esta velocidad provoca la energía necesaria para la operación. Sin embargo, un porcentaje de energía se disipa como calor y ruido.

Existen varios tipos de molinos utilizados en la minería, los más comunes son:

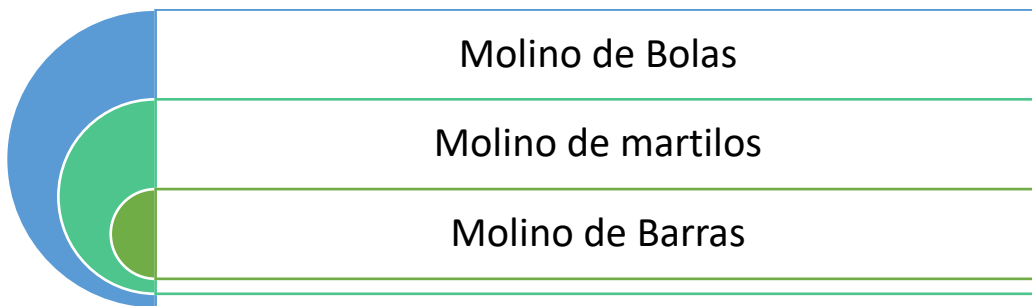


Figura 9. *Tipos de Molinos*

En cuanto a la operación del molino, esta comienza con el cilindro girando sobre ejes o extremos huecos. A continuación, se procede a la alimentación del molino introduciendo el material a moler mezclado con agua. Se debe analizar las distintas operaciones, por ejemplo, si hay que ajustar el contenido de sólidos en peso o volumen por el espacio hueco del eje, y también revisar la vida útil de los cuerpos moledores. Finalmente, por el otro extremo (según el tipo de vertido: de rebose, lateral, central, otro) se produce una salida continua de material molido, normalmente arrastrado por una corriente de agua o de aire (Blanco, 2014).

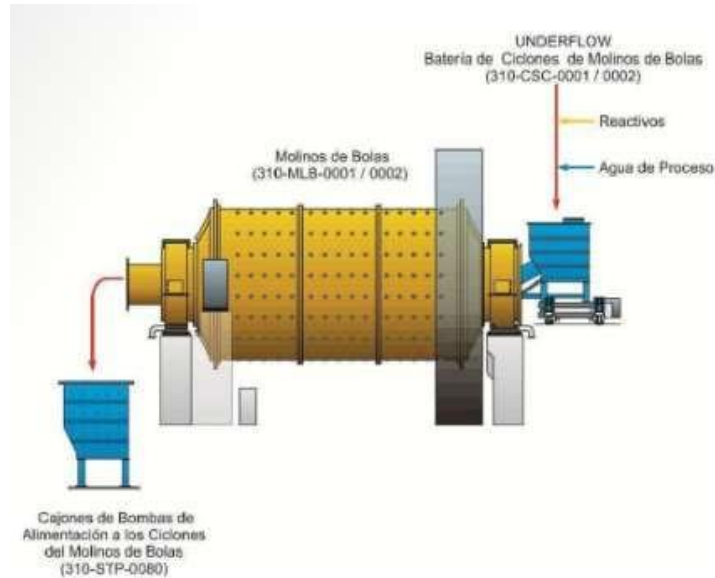
4.9. Molino de Bolas

El molino de bolas en la minería funciona mediante la rotación de un cilindro horizontal que contiene bolas de acero u otros medios de molienda, donde el material a moler se introduce en el cilindro a través de la alimentación, y a medida que el molino gira, las bolas de acero chocan y trituran el material, reduciendo su tamaño.

Los molinos de bolas son equipos cilíndricos o cónicos que giran alrededor de un eje horizontal, y se cargan con bolas de acero, pedernal o porcelana, que actúan como medio de molienda. Para asegurar un rendimiento óptimo, la alimentación en los molinos de bolas debe tener un tamaño de 2.4 a 4 cm en el caso de materiales frágiles, aunque generalmente se establece un tamaño máximo de 1.3 cm, valores que han sido determinados a través de experimentos y pruebas.

Casi todos los molinos de bolas trabajan con una relación de reducción que varía de 20:1 a 200:1 (Alcántara Valladares, 2008)

Figura 10. Molino de bolas



Nota. Falcon (2021)

Los molinos de bolas tienen diferentes tipos de descarga, que se especifican en el siguiente cuadro, que se relacionan directamente con tus tipos de molienda ya sea húmeda, seca o ambas:

Tipos de Descarga			
	Rebalse	Diafragma	Compartimentado
Tipos de Molienda	Húmeda	Seca o Húmeda	Seca o Húmeda
Tipos de Circuitos	Cerrado	Cerrado	Cerrado o Abierto
Tamaño de Molienda	Fino – Malla 200	Intermedio (Vía Húmeda) – Malla 65-100; Fino (Vía Seca) – Malla 325	Fino – Malla 150-325
Tamaño Máximo de Alimentación	Malla 10-14	< 1/2"	< 1/2"
Relación L/D	1-1,5:1	1-1,5:1	C. Abierto: 3,5-5:1 C. Cerrado: 2,5-3,5:1
% Típico de Vel. Crítica	65-70 %	68-78%	C. Abierto: 65-75 % C. Cerrado: 70-78 %
% de Carga	40-45 %	35-50 %	30-50 %

Figura 11. Tipos de descarga del molino de bolas

Nota. (Universidad de Buenos Aires, 2015)

4.9.1. Tipos de molinos de bolas

Según Rodríguez y Almonte (2021), exponen que:

Dentro de los tipos más significativos de molinos de bolas se incluyen el molino planetario, el molino attritor, el molino de tambor y el molino de bolas de alta energía. Estos diversos tipos de molinos de bolas se caracterizan por sus diferentes principios de funcionamiento, diseños, capacidades y sistemas de movimiento para satisfacer diversas necesidades de molienda en diferentes aplicaciones industriales.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los tipos de molinos

Tipo	Ventajas	Desventajas
Planetario	Trituración rápida y potente. Molienda en seco. Velocidades de impacto altas. Facilidad de carga y descarga.	Desgaste de las paredes del molino y en las bolas. Costo elevado de elaboración.
Attritor	Gran velocidad de impacto Fácil construcción. Fácil Mantenimiento Sistema sencillo. Obtención de granulometrías muy finas	Costo del sello para mantener el vacío. Mantener un sistema de refrigeración. Pérdida abundante del material a alear. Desgaste de impulsores y bolas. Contaminación del material a alear.
Tambor	Molienda rápida y potente. Grandes cantidades de muestra. Operación con barras o bolas.	Material previamente triturado. Contaminación del material a alear por desgaste de los medios moledores.

Alta energía	Tiempos cortos de molienda. Obtención de aleaciones nanométricas. Moliendas de máxima intensidad.	Costo elevado de elaboración. Contaminación del material alear por desgaste de los medios moledores.
--------------	---	---

Nota. Elaborado por el autor, tomado de (Rodríguez y Almonte, 2021).

4.10. Partes de un Molino de Bolas

Según Blanco (2015) expone que:

Un molino en la industria minera consta de varias partes principales que trabajan juntas para llevar a cabo el proceso de molienda. Estas partes incluyen:

- Coraza: es generalmente de forma cilíndrica, muy resistente con anclaje de revestimientos interiores. Cabezas laterales: zonas con curvaturas que soportan grandes esfuerzos, por un axial ingresa la carga y por el axial opuesto se extrae el material fragmentado.
- Boca de carga y descarga: hendiduras donde se encuentran los rodamientos, la carga se la puede realizar por admisión directa, tambor de alimentación o alimentador de cuchara.
- Rodamientos: dinamizan el movimiento de giro disminuyendo significativamente los rozamientos.
- Piñón de ataque: corresponde al sistema de accionamiento, el cual debe estar correctamente protegido.
- Rejilla: componente de clasificación interna.
- Rejilla de salida: se encuentra en la boca de descarga para impedir la entrada de cuerpos voluminosos en el clasificador.

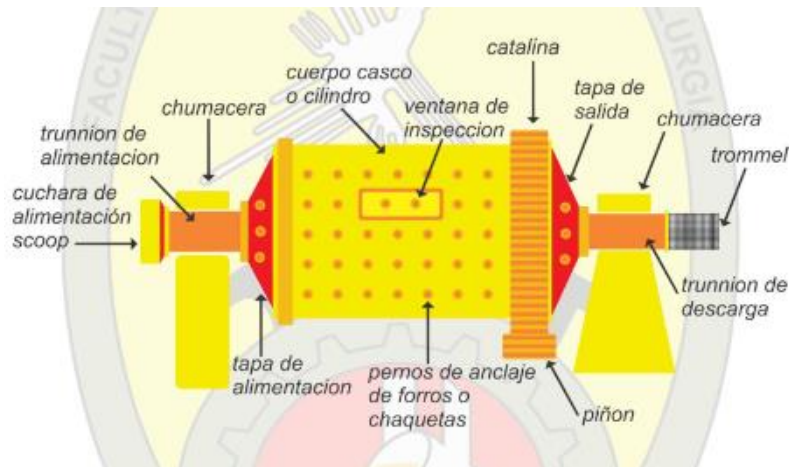


Figura 12. *Pates de un molino de bolas*

Nota. (Facultad de Ingeniería en Minas y Metalurgia,2016)

4.10.1. Funcionamiento de los molinos de bolas

Según lo estudiado en Beneficio se entiende que el funcionamiento de un molino de bolas se basa en varios principios claves que permiten la molienda efectiva de materiales, entre los cuales tenemos:

- Rotación del cilindro
- Carga de bolas de molienda
- Alimentación del material
- Impacto y fricción
- Descarga del material

De acuerdo con Cabezas (2017) afirma que:

Los molinos de bolas rotan sobre sus ejes a una velocidad específica, la cual varía según el diámetro del molino. Para llevar a cabo la operación de molienda, se utilizan bolas de acero con diversos diámetros, así como diferentes niveles de dureza y composición siderúrgica.

Al iniciar la operación del molino, las bolas y el mineral son arrastrados por las ondulaciones de una chaqueta, ascendiendo a una altura específica antes de caer. Durante este proceso, las bolas giran y chocan entre sí, así como contra los revestimientos interiores, de manera repetitiva. Estos impactos entre las esferas son los responsables de la pulverización del mineral.

4.10.2. Parámetros de diseño del Molino de bolas

Al diseñar un molino de bolas, se deben tener en cuenta varios parámetros importantes para garantizar un rendimiento óptimo y eficiente. Estos parámetros de diseño incluyen:

- Capacidad
- Tamaño y relación longitud-diámetro
- Velocidad de rotación
- Grado de llenado
- Distribución de tamaño de las bolas de molienda
- Revestimiento del molino

Es importante destacar que “Existen diversas técnicas inmersas en el funcionamiento del molino, tales como: velocidad crítica, relación entre los elementos variables del molino, el tamaño

máximo de los elementos de molienda, el volumen de carga, la potencia suministrada y el tipo de molienda” (Astuhuaman, 2019).

4.11. Variables de Operación de los Molinos de bolas

4.11.1. Fracción de llenado

El grado de llenado se refiere a la proporción del volumen útil del molino ocupado por el material a moler y los medios de molienda (por ejemplo, bolas de acero en el caso de un molino de bolas). Es un parámetro importante que influye en la eficiencia y el rendimiento de la molienda.

El funcionamiento del molino se ve directamente afectado por este factor, por lo tanto, se utiliza comúnmente una fracción de llenado que oscila entre el 50% y el 55% de la carga total del molino. Si se excede estos porcentajes, el exceso de material dentro del molino obstaculizará su movimiento, lo que resultará en una falta de eficiencia en la molienda. No obstante, en la práctica, la carga del molino suele estar en un rango del 40% al 55% del volumen, siendo la opción más frecuente un llenado del 45% (Blanco, 2014).

Matemáticamente, el factor de llenado se puede calcular mediante la siguiente formula:

$$J = \frac{\textit{masa de bolas}}{\textit{densidad de bolas} \cdot \textit{volumen del molino}} * 10.6$$

4.11.2. Carga de medios moledores

La carga de medios moledores se refiere específicamente a la cantidad de bolas u otros objetos duros y resistentes que se introducen en el molino para realizar el proceso de molienda. Estos medios moledores son los responsables de romper y triturar las partículas de mineral, reduciéndolas a un tamaño más pequeño.

La carga de bolas representa la fracción o porcentaje del volumen que ocupan dichos elementos dentro del molino. El tamaño del material más grande de alimentación que se tenga, tiene que ser fragmentado por el medio molidor de mayor tamaño, es decir, los medios moledores de un mayor tamaño serán requeridos para fragmentar un material grueso, mientras que para un material de menor grosor (fino) serán necesarios medios moledores de un menor tamaño (Martínez & Díaz, 2016).

Se utiliza la siguiente fórmula:

$$Vb = \textit{fracción de llenado de bolas} * Vt * (1 - \textit{porosidad})$$

Donde:

Vb: carga de medios moledores

V_t : volumen del Molino

4.11.3. *Velocidad de Giro*

La velocidad de rotación del molino tiene un impacto tanto en el consumo como en su funcionamiento. Cuando el molino gira sobre su eje, la carga se desplaza hasta que la resistencia generada por el peso de la carga equilibra la potencia del motor. Esto permite que el molino y sus componentes se muevan, lo que a su vez permite la molienda del mineral de manera efectiva.

El movimiento del molino es generado mediante diferentes sistemas de acoplamiento entre el motor y el molino, los cuales suelen ser seleccionados en base al tamaño del molino (Cabezas, 2017).

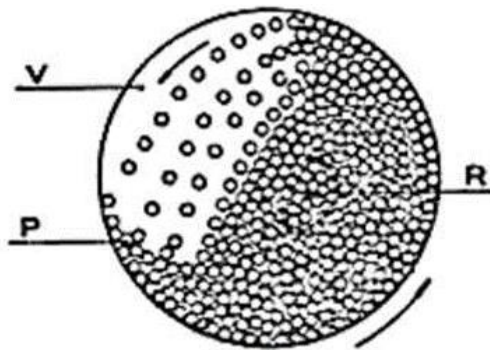


Figura 13. Vista de rotación en cascada de un molino de bolas
Nota. (Cabezas, 2017).

La velocidad de rotación puede producir dos efectos:

Efecto cascada: se produce cuando las velocidades son relativamente bajas, lo que provoca que los componentes del molino rueden hacia la parte inferior, llegando hasta el pie del molino. En este proceso, la pulverización del material se produce principalmente por abrasión, lo que resulta en una molienda más fina. Sin embargo, esta situación también conlleva una mayor generación de lamas y un desgaste más pronunciado del revestimiento del molino (Cárcamo, 2003).

Efecto catarata: este se produce cuando las velocidades son relativamente altas, lo que hace que los componentes del molino sean lanzados desde la carga y sigan trayectorias en forma de parábolas antes de caer hacia el fondo. Esto resulta en una molienda que se produce principalmente por impacto, lo que da como resultado un producto final más grueso. Además, este efecto de catarata tiene la ventaja de generar un desgaste menor en el revestimiento del molino (Cárcamo, 2003).

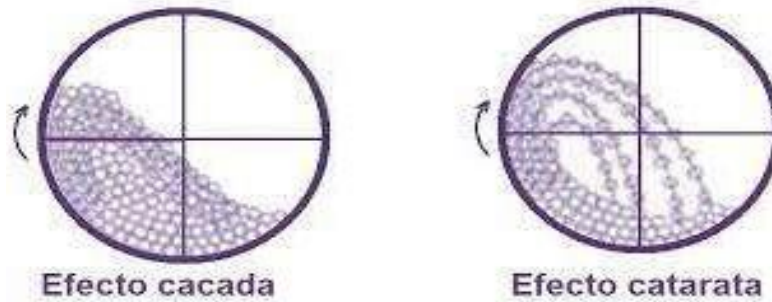


Figura 14. Representación de los dos tipos de movimiento
Nota. (Ortíz, 2020)

4.11.4. Velocidad Crítica

La velocidad crítica se refiere a la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos molidores, manteniendo su peso equilibrado en todo momento. Como resultado, estos elementos quedan adheridos a las paredes internas del molino y no generan fricción necesaria para la molienda del material. Es por ello que el molino debe trabajar a velocidades por debajo de la crítica (Universidad de Buenos Aires, 2015).

Se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_{crit} = \frac{42.2}{\sqrt{D - d}}$$

En donde:

V_c : Velocidad crítica en r.p.m

D : Diámetro interno del molino en m

d : Diámetro del medio molidor más grande en m

Después del cálculo de la velocidad crítica, se procede a calcular el diámetro interno:

$$D = D_n - 2E_f * \frac{D_b}{2}$$

En donde:

D_n : Diámetro nominal del molino, indicado normalmente en catálogo

E_f : Espesor medio de los forros

D_b : Diámetro medio de las bolas/barras

4.11.5. *Potencia*

La máxima potencia se alcanza cuando el volumen de carga del molino supera el 30% y se sitúa en torno al 50%, aunque normalmente se trabaja en un rango de potencia del 35% al 40% (Cabezas, 2017).

4.11.6. *Tamaño Máximo de bolas de acero*

Según (Zumaran, 2017) expone que:

Para calcular el tamaño máximo de bola en la molienda, es imprescindible tener información sobre el tamaño promedio del material a moler, así como ciertos parámetros característicos tanto del material en sí como del molino utilizado. El tamaño máximo de bola se establece mediante la aplicación de la siguiente ecuación desarrollada por Bond:

$$Db(mm) = 25.4 \left[\left(\frac{F80}{K} \right)^{0.5} \left(\frac{sg * Wi}{100 * \varphi c * \sqrt{3.281 D}} \right)^{0.33} \right]$$

Donde:

DB = Tamaño máximo de bola (mm)

$F80$ = Tamaño 80% acumulado pasante en la alimentación (μm)

Wi = Índice de trabajo de bond (Kwh/Tc)

Sg = Gravedad específica del material alimentado (gr/cm^3)

φc = Fracción de la velocidad crítica

D = Diámetro interior del molino (m)

K = Constante empírica, para molienda en seco en circuito cerrado o abierto (335)

Esta ecuación considera factores como la dureza y resistencia del material, así como las dimensiones y características del molino, para determinar el tamaño óptimo de las bolas a utilizar en el proceso de molienda. Es un aspecto crítico a considerar para lograr una eficiente conminución y obtener un producto final adecuado dentro de los parámetros deseados en la operación.

4.11.7. *Carga de Medios de molienda*

La carga de medios de molienda se refiere a la cantidad total de material dentro del molino que participa en el proceso de molienda. Esto incluye no solo los medios moledores (como bolas de acero), sino también el material que está siendo molido (mineral) y cualquier otro componente presente en el molino, como el agua o el material de alimentación.

En un molino de bolas, es de suma importancia calcular la carga de bolas, ya que esto influye directamente en la cantidad de material que será sometido a molienda.

Para realizar este cálculo, es necesario determinar el volumen aparente ocupado por el conjunto de bolas presentes en el molino. Dicho volumen se puede obtener mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$Vm = \psi * \frac{\pi * D^2 * L}{4}$$

Donde:

V_m = Volumen aparente ocupado por el montón de bolas (m³)

ψ = Grado de llenado de las bolas en el apilamiento (%)

D = Diámetro del molino (m)

L = Longitud del molino (m)

Este cálculo es esencial para garantizar una distribución adecuada de la carga de bolas en el molino, lo que a su vez asegura una eficiente molienda y un control preciso del proceso, optimizando así el rendimiento y la calidad del producto obtenido.

Con este volumen se determina la carga de bolas mediante la siguiente relación:

$$G = g_m * V_m$$

Donde:

G = Peso de la carga de bolas (Kg)

V_m = Volumen aparente ocupado por las bolas (m³)

g_m = Peso específico aparente del apilamiento de bolas (4.55 T/m³) (Zumaran, 2017).

4.12. Variables y Parámetros físico-mecánicos

4.12.1. Diseño del tambor

Para el diseño del tambor se debe considerar variables como son la cantidad de material que se presente moler, la densidad de los materiales a moler y el material del cual se va a fabricar el tambor el cual puede ser una aleación de CuAl al 10%, para lo cual se lo calcula de la siguiente manera:

$$d = \frac{m}{v}$$

Donde:

d: densidad en g/cm³

m= masa en g.

V= volumen en cm³

Dicha fórmula nos ayuda para conocer el volumen del material o materiales de fabricación del tambor.

Después de encontrar el volumen de los materiales procedemos a realizar el cálculo para el volumen total que va a ocupar el tambor, tomando como ejemplo que los materiales de este sean una aleación de CuAl al 10%.

$$V_t = V_{Cu} + V_{Al}$$

Dado que el volumen del cilindro debe ser lo suficientemente grande para contener tanto el cobre como el aluminio, se considera un valor cuatro veces mayor al volumen total de ambos materiales.

Esta ampliación del volumen es necesaria para permitir la incorporación de los elementos molidores y el material a moler, lo que facilita el proceso de molienda.

$$V_c = 4V_t$$

$$V_c = \pi * r^2 * L$$

Se debe tener en cuenta que la relación de la longitud diámetro de los molinos de bolas es de 1 a 2 (Cabezas, 2017).

4.12.2. *Espesor del tambor*

El espesor del tambor es un aspecto crucial, ya que debe tener la resistencia necesaria para soportar el impacto generado durante el proceso de molienda.

Diámetro del tambor del molino	Espesor de la chapa
Hasta 1.6 m	18 mm
de 1.6 a 2.0 m	20 mm
de 2.0 a 2.2 m	25.5 mm
de 2.2 a 2.4 m	28 mm
de 2.5 a 3.5 m	38 mm
de 3.5 a 4.50 m	52 mm
De 4.25 a 4.50 m	58 mm
5.0 m	63,5 mm

Figura 15. *Relación entre elementos y variables*
Nota. (Cabezas, 2017).

4.12.3. Dimensión de las tapas del tambor

Se lo calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Dt = D + 2f$$

Donde:

Dt: diámetro de las tapas del tambor en m.

D: diámetro interior del tambor en m.

f: espesor en m.

4.12.4. Tipo de transmisión

En el caso de este tipo de molino, las opciones de transmisión disponibles son mediante bandas o cadenas. Para la selección de la transmisión, se toma en cuenta que las bandas tienden a tener una eficiencia en el rango de 98% a 93%, lo que puede generar un deslizamiento y disminuir la precisión en la relación de velocidad. Por otro lado, las cadenas no presentan este deslizamiento, lo que las hace más adecuadas para la transmisión.

4.12.5. Funcionamiento de un molino de bolas

Según lo estudiado en Beneficio se entiende que el funcionamiento de un molino de bolas se basa en varios principios claves que permiten la molienda efectiva de materiales, entre los cuales tenemos:

- Rotación del cilindro
- Carga de bolas de molienda
- Alimentación del material
- Impacto y fricción
- Descarga del material

De acuerdo con Cabezas (2017) afirma que:

Los molinos de bolas rotan sobre sus ejes a una velocidad específica, la cual varía según el diámetro del molino. Para llevar a cabo la operación de molienda, se utilizan bolas de acero con diversos diámetros, así como diferentes niveles de dureza y composición siderúrgica.

Al iniciar la operación del molino, las bolas y el mineral son arrastrados por las ondulaciones de una chaqueta, ascendiendo a una altura específica antes de caer. Durante este proceso, las bolas giran y chocan entre sí, así como contra los revestimientos interiores, de manera repetitiva. Estos impactos entre las esferas son los responsables de la pulverización del mineral.

4.13. Descripción de molino de bolas a tomar en cuenta para el diseño

4.13.1. Molino de bolas de la Universidad Técnica Particular de Loja



Figura 16. Tipos de descarga del molino de bolas

El molino de bolas del laboratorio de la Universidad Técnica Particular de Loja, cuenta con las siguientes características:

Se describe como un molino de bolas Batch de laboratorio (9,8pulg. x7.2 pulg.)

- Estructura de apoyo: Cuenta con una estructura de metal de forma rectangular con cuatro patas con refuerzo, las cuales tienen una medida de 30 cm de alto y 40 cm de largo, el refuerzo rectangular se encuentra a 17 cm del piso a la base.
- Sistema de movimiento: Su sistema de movimiento es mediante de rodillos, 3 para ser precisos los cuales son del mismo tamaño cada uno, de 46 cm de largo y con un diámetro de 16cm.
- Banda plástica; la banda plástica puede estar colocada en 5 niveles diferentes, los cuales sirven para regular la velocidad de molienda.
- Chumaceras: Cuenta con 3 chumaceras para sus 3 rodillos los cuales son ensamblados mediante un eje que los atraviesa.
- Motor: Es un modelo C560394, accionado por un motor eléctrico de $\frac{1}{2}$ HP, con una velocidad de rotación crítica de 74 rpm, con una carga de molienda 11.813,93gr.
- Interruptor: Cuenta con un interruptor en la parte superior del motor el cual tiene la función de encender y apagar el molino

- Medio Moedor: El medio moedor es de acero al manganeso de diferente diámetro que varía entre 14 y 7 cm, el cual al momento de realizar la molienda se los coloca a todas las bolas sin importar el tamaño.
- Tambor: El tambor es de 9,8pulg. x7.2 pulg, el cual sirve para una molienda en seco o húmeda, este cuenta con 3 cm de grosor el cual 1cm es de recubrimiento y el sobrante es de acero para la estructura del tambor.
- Carga y descarga: La carga y descarga se lo realiza por una tapa que tiene el cilindro el cual es desmontable para colocar la muestra y el medio moedor.

Desventajas observadas:

1. Eficiencia de producción limitada

- La operación intermitente del molino de bolas Batch reduce la productividad en comparación con los molinos de bolas continuos.
- El tiempo necesario para cargar y descargar el material disminuye la eficiencia del proceso de molienda.

2. Variabilidad de la molienda

- Las condiciones de operación en lotes pueden variar, lo que resulta en una mayor variabilidad en el tamaño de partícula del producto final.
- Cada lote puede experimentar condiciones de molienda ligeramente diferentes, afectando la consistencia del resultado.

3. Control del proceso menos preciso:

- Requiere un monitoreo meticuloso para mantener una molienda uniforme y constante en cada lote.
- La variabilidad en las condiciones de operación puede dificultar el control preciso del tamaño de partícula y distribución.

4. Mayor consumo de energía:

- Experimenta arranques y paradas frecuentes, lo que puede resultar en un mayor consumo de energía.
- La eficiencia energética se ve afectada negativamente debido a la operación intermitente y cambios en las condiciones de carga.

5. Desgaste del equipo más frecuente:

- La carga y descarga repetitiva del material aumenta el desgaste del tambor y los revestimientos internos del molino.
- Puede requerir mantenimiento y reemplazo más frecuente de los componentes, lo que puede aumentar los costos operativos.

6. Estructura inutilizada

- Al contar con un solo tambor de molienda, no es necesario tener 3 rodillos en el sistema de accionamiento, lo cual resulta en la inutilización de un rodillo y eso se traduce en gastos constructivos.

4.13.2. Molino de bolas de compartimientos múltiples

Existen molinos de dos compartimentos que consisten en dos compartimentos separados dentro del cilindro del molino. Estos compartimentos pueden albergar barras y bolas, o bolas de diferentes tamaños. Esta configuración permite realizar tanto la molienda gruesa como la fina en un solo equipo.



Figura 17. Tipos de descarga del molino de bolas

Nota. (Cevallos Villavicencio & Caiza López, 2019)

La relación longitud/diámetro de estos molinos se encuentra limitada entre 3/1 y 5/1, con diámetros mayores que varían entre 1,2 y 4,5 metros y longitudes entre 6 y 14 metros. Estos molinos han sido empleados en la industria del cemento y también son adecuados para procesar grandes volúmenes de materiales duros y abrasivos.

Nota: Los molinos antes mencionados sirvieron para obtener un diseño propio y eficiente del molino de bolas.

5. Metodología

5.1. Área de estudio

El proyecto involucra diferentes áreas de estudio esenciales para su desarrollo. En primer lugar, se llevarán a cabo ensayos en el laboratorio de minas de la Universidad Nacional de Loja, ubicado en la provincia de Loja, cantón Loja, con dirección en Av. Pio Jaramillo Alvarado y Reinaldo Espinoza. En este laboratorio, se realizarán pruebas de molienda del material mineralizado proveniente de la región Sur del Ecuador donde se evaluarán las variables y parámetros, como el tiempo de molienda, consumo de energía, distribución de tamaños, capacidad y producción, eficiencia de molienda, medición de ruido y velocidades críticas.

Por otro lado, se tiene el área del taller mecánico donde se llevará a cabo la construcción del molino de bolas, situado en la ciudad de Loja, específicamente entre la Av. Alonso de mercadillo y Ramón Pinto.

El enfoque multidisciplinario y la combinación de pruebas en el laboratorio de minas con material mineralizado aseguran una evaluación integral y precisa de las variables y parámetros clave para el desarrollo exitoso del molino de bolas ya que esto permite obtener resultados confiables para mejorar el diseño y optimizar el rendimiento del molino en futuras aplicaciones.

5.2. Ubicación Geográfica

El laboratorio de minas de la Universidad Nacional de Loja está situado en la provincia de Loja, cantón Loja, con dirección en Av. Pio Jaramillo Alvarado y Reinaldo Espinoza.

Geográficamente el laboratorio se encuentra limitado por las coordenadas WGS84, Zona 17 Sur, las mismas que se detallan en la tabla a continuación:

Tabla 2. Laboratorio de la Universidad Nacional de Loja

<i>DATUM</i>	WGS84	
PUNTOS	X	Y
1	9554210.59	699862.52
2	9554206.46	699876.30
3	9554200.24	699859.72
4	9554199.44	699864.25
5	9554191.59	699862.30
6	9554192.01	699858.13
7	9554172.16	699853.60

5.3. Materiales

Los distintos materiales que se usaron para la realización del proyecto se los ha colocado en la siguiente tabla:

- Materiales de Gabinete y de Campo

Tabla 3. Materiales Gabinete y de Campo

Materiales de Gabinete (oficina)	Materiales de campo
Computador	Libreta de campo
Impresora	Bolsas para muestras
Reglas y escuadras	Cámara fotográfica
Papel (papel para dibujo técnico, papel milimetrado, papel bond, papel de croquis)	Cinta métrica
Microsoft Word	
Software Excel	
Software AUTOCAD	

- Materiales de Laboratorio

Tabla 4. Materiales de laboratorio

Materiales de laboratorio	
Herramientas de medición	Sistema de Tamices Balanza analítica Cronómetro
Equipos de Protección Personal (EPP)	Gafas de seguridad Guantes de protección Tapones Batas Mascarillas
Instrumentos de medición de variables	Medidores de flujo, medidores de presión, medidores de velocidad de rotación, entre otros
Diferentes muestras de prueba provenientes de la región Sur del Ecuador	

- Materiales de Laboratorio

Tabla 5. Materiales de Taller

Materiales de taller			
Herramientas e implementos de mano	Libreta	Equipos de Protección Personal (EPP)	Gafas de seguridad
	Destornilladores		Guantes de protección
	Alicates		Tapones
	Pinzas		Overol
	Llaves		Mascarillas
	Bolsas de muestra		Casco
	Estas herramientas son esenciales para el ajuste de los componentes del molino de bolas.		Botas punta de acero
			Chaleco
Materiales para mecanizado			
Equipo de soldadura y corte			
Instrumentos de medición			

5.4.Procedimiento

El proyecto se fundamentó en el método cuantitativo, el cual involucra diversas etapas que abarcan tanto trabajo de campo, laboratorio y oficina, las cuales abarcan actividades sistemáticas. A continuación, presento una descripción concisa de las actividades a llevar a cabo en cada una de estas etapas propuestas.

- **Fase de campo:** En esta fase se llevaron a cabo actividades prácticas para recopilar datos, realizar mediciones y obtener muestras representativas de los materiales mineralizados de la región Sur del Ecuador, que luego se sometieron a pruebas de molienda en el molino diseñado. Además, se identificaron exhaustivamente variables y parámetros relevantes para el diseño del molino de bolas, considerando elementos como la capacidad de molienda, el tamaño de partícula y la dureza del material, junto con la caracterización detallada de accesorios y complementos esenciales para la construcción del equipo.
- **Fase de laboratorio:** Esta fase implicó actividades experimentales y pruebas en un entorno controlado para lograr los objetivos específicos del diseño del molino de bolas. Inicialmente, se realizó un análisis detallado de las variables y parámetros que influían en el diseño, incluyendo el tamaño y tipo de medios de molienda, velocidad de rotación y carga

de bolas. Con esta información, se procedió a la construcción física del molino y seleccionando materiales, posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de molienda con materiales mineralizados de la región Sur del Ecuador para validar el modelo de diseño. Estas pruebas abarcaron aspectos como eficiencia de molienda, distribución de tamaño de partículas y otros parámetros relevantes. Los ensayos cuantitativos incluyeron mediciones de dimensiones, así como pruebas de eficiencia de molienda. Finalmente, se analizaron los datos obtenidos para evaluar el rendimiento del molino.

- **Fase de oficina:** En esta fase, se llevó a cabo una amplia investigación para comprender los requisitos y necesidades específicas del proyecto. Esto implicó la recolección de información relevante, incluyendo el estudio de referencias técnicas, la consulta con expertos en el campo y la revisión de estándares aplicables. Se elaboró un plan detallado que abarcaba objetivos, plazos, recursos necesarios e hitos clave del proyecto. Además, se realizó un profundo análisis de variables y parámetros que influían en el diseño del molino de bolas, definiendo así las características clave del mismo. Utilizando software de diseño (AUTOCAD, Inventor y SolidWorks), se elaboraron los diseños técnicos y planos del molino, asegurando la compatibilidad de los accesorios. Además, se desarrolló un plan detallado para la construcción del molino, que incluyó la selección de materiales, la estimación de costos y recursos necesarios. Finalmente, se documentaron todas las etapas del proyecto, incluyendo registros de diseño e informes de análisis y pruebas

5.5. Metodología para el primer objetivo

“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.”

5.5.1. Recolección de información, variables y características

En la fase inicial, se llevó a cabo una extensa 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 carga y descarga.

Una vez recopiladas las fuentes, se procedió analizar minuciosamente las ecuaciones y modelos matemáticos presentes.

5.5.2. 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), la longitud del molino (L), la carga de bolas (C), el tamaño máximo de alimentación (dmax), transmisión óptima, entre otros.
- Variables físicas: velocidad de rotación (N), el diámetro del tambor (Dm), la carga de bolas (Cb), la eficiencia de molienda (Em), y la potencia requerida para la operación (P requerida).
- Parámetros: potencia requerida (P), la capacidad de molienda (Q), el tamaño de partícula final deseado (d50 o P50), la eficiencia de molienda (E), la 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.

5.5.3. 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 lo cual hubo una guía técnica por parte del Arq. Galo Alexander Cajas y del Lic. En mecánica Beymar Jimenez.

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.
- 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.

5.5.4. *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 detallado de las ecuaciones y modelos matemáticos generales asociados a distintos tipos de molinos. Este análisis permitió la identificación de variables y parámetros clave que impactan en el rendimiento y eficiencia de cada molino, considerando aspectos de diseño como la geometría del tambor y los medios de molienda.

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

Para llevar a cabo el diseño, se emplearon herramientas CAD que facilitaron la creación de modelos en 3D, planos técnicos y simulaciones para la construcción del molino de bolas teniendo en cuenta las especificaciones y parámetros definidos previamente, entre los programas tenemos: AUTOCAD, Inventor y Solidworks.

5.5.5. *Cálculo modelado de parámetros y variables*

Se utilizó ecuaciones y modelos matemáticos para calcular los parámetros y las variables antes mencionadas, tales como 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:

Tabla 6. *Fórmulas relevantes.*

<p>✓ Potencia teórica necesaria</p> $Pt = 12.5 * H$	<p>✓ Potencia real necesaria</p> $P = Pt + 20\% * Pt$	<p>✓ Velocidad crítica</p> $Vc = \left(\frac{42.3}{\sqrt{D}(m)}\right)$
<p>✓ Grado de llenado (húmedo)</p> <p>Grado de Llenado = (Volumen de bolas dentro del molino) / (Volumen total del molino)</p>	<p>✓ Grado de llenado</p> $J = 113 - 126 * \left(\frac{DK}{D}\right), \%$	<p>✓ Energía de bond</p> $Eb = 10 * wi \left(\frac{1}{\sqrt{P80}}\right) - \left(\frac{1}{\sqrt{F80}}\right)$
<p>✓ Potencia absorbida y útil</p> $Pa = EB * Q$	<p>✓ Diámetro de las tapas</p> $Dt = D + 2f$	<p>✓ Dimensiones de las tapas del tambor</p> $Dt = D + 2f$
<p>✓ Volumen real del tambor</p> $Vm = \frac{(\pi * D^2 * L)}{(4)}$	<p>✓ Velocidad crítica por transmisión</p> $\frac{m \cdot V^2}{R} = m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$	<p>✓ Comprobación de la Velocidad crítica</p> $\frac{\phi_{P1}}{\phi_{P2}} \cdot \frac{\phi_{P1}}{\phi_{P2}}$
<p>✓ Torque efectuado en el eje del cilindro</p> $\tau_s = \frac{Pot_{D1} \cdot \eta_c^2}{\omega_4}$	<p>✓ Volumen que ocupa las Bolas y el Mineral</p> $V_T = 0,5 \cdot V_C = 0,5 \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot l$	<p>✓ Peso que ejerce el Material Ingresado al Cilindro</p> $F_T = \gamma_M \cdot V_M + \gamma_B \cdot V_B + \gamma_A \cdot V_A$
<p>✓ Torque máximo que se va a aprovechar</p> $\tau_A = F_T \cdot r_G$	<p>✓ Potencia máxima que se va a aprovechar</p> $Pot_{D2} = \frac{\tau_A \cdot \omega_4}{\eta_c^2} \cdot FS_2$	<p>✓ Número de correas o bandas</p> $z_{C1} = \frac{Pot_{D2}}{Pot_{C1}}$

Nota. Elaborado por el autor, tomado de (Amores Balseca & Maldonado Bernabé, 2019)

5.6. Metodología para el segundo objetivo

“Construir el molino de bolas a partir de las variables y parámetros deseados.”

El proceso de construcción no solo se basó en la selección de materiales y componentes adecuados, sino también en la optimización de factores clave, como la capacidad de molienda, la eficiencia operativa y la adaptación a las características específicas del material mineralizado.

Antes de comenzar la construcción, se realizó una minuciosa preparación del área de trabajo. Se organizaron las herramientas y equipos necesarios, se establecieron las medidas de seguridad adecuadas y se verificó la disponibilidad de todos los componentes.

5.6.1. 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 profunda 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 manera eficiente y efectiva, evitando retrasos y asegurando la calidad del resultado final.

Tabla 7. *Lista de componentes*

Elemento	Cantidad	Nº de pieza	Descripción
1	1	Base de la máquina	Tubo cuadrado 5x5 cm
2	1	Base del motor	Base fija del motor
3	1	Pasador de base motor	Pasador de la base del motor
4	2	SKF SY 1.1/2 FM	Chumacera de 1 ½
5	1	Correa A53	Correa trapezoidal A53
6	2	SKF SY 1 TR	Chumacera 1”
7	1	Correa A47	Correa trapezoidal A47
8	1	Motor 56 right	Motor ¾ HP, 1755 rpm, monofásico
9	1	Regulación del motor	Perno tensor

10	1	Eje medio	Eje conductor
11	1	Polea escalonada	Polea 2,3 y 4"
12	3	Poleas	Polea de 12", 14", y 3 ½"
13	2	Chaveta eje medio	Chaveta de los dos ejes
14	1	Tornillo de sujeción	Tornillo que sujeta la tapa
15	1	Caucho tapa del cilindro	Tapa del cilindro
16	1	Polea 1.1.	Polea de 3 ½"

5.6.2. 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.

5.6.3. 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.

5.7. Metodología para el tercer objetivo

“Validación del modelo tomando como base los materiales mineralizados de la región Sur del país.”

En esta etapa, se buscó confirmar la viabilidad y eficacia del diseño propuesto del molino de bolas mediante pruebas prácticas utilizando muestras reales de minerales provenientes de la región Sur del Ecuador.

5.7.1. 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.

Tabla 8. Propiedades índices de las rocas.

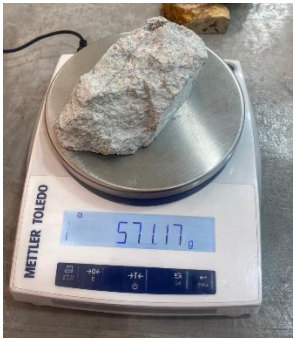
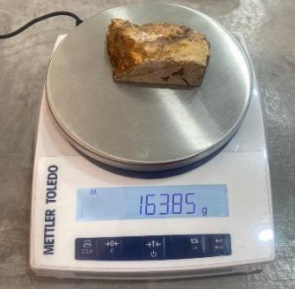

<p>✓ Contenido de humedad</p> $CH = \frac{W - W_{SECO}}{W_{SECO}} * 100$	<p>✓ Porosidad eficaz</p> $ne = \frac{W_{sat} - W_{seco}}{W_{sat} - W_{sumergido}}$	<p>✓ Peso específico aparente</p> $pa = \frac{W_{seco}}{W_{sat} - W_{sumergido}} * pw$
<p>✓ Peso específico real</p> $pr = \frac{W_{pulverizada}}{W_2 - W_{pulverizada} - W_1} * pw$	<p>✓ Porosidad</p> $n = \left(1 - \frac{pa}{pr}\right) * 100$	<p>✓ Porosidad cerrada</p> $nc = n - ne$
<p>✓ Coeficiente de absorción</p> $C_{abs} = \frac{W_{sat} - W_{seco}}{W_{seco}} * 100$	<p>✓ Compacidad</p> $C = 100 - n$	<p>✓ Módulo de saturación</p> $M_{sat} = \frac{ne}{n} * 100$

Nota. Elaborado por el autor, tomado del laboratorio de la universidad UNL

5.7.2. Trabajos previos para la identificación de las 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.

Tabla 9. Muestras mineralizadas representativas

		
CHINAPINZA	TORATA	SANTA ISABEL

- 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.



Figura 18. *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.



Figura 19. *Trituración de muestras para 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.



Figura 20. *Muestras pasante malla #200*

- 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.



Figura 21. *Introducción de la muestra al picnómetro*

- 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.



Figura 22. *Peso de muestras picnómetro*

- 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.

5.7.3. 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.

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.

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.

“La trituración es un proceso de fragmentación termodinámica de partículas, en el cual se entrega energía mecánica generando un esfuerzo que permite llevar a cabo su objetivo” (Pástor Yáñez, C.A. 2022.).



Figura 23. *Peso de muestras trituradas*

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 la utilización de las siguientes fórmulas:

Tabla 10. *Rosin-Rammler*

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

Nota. Elaborado por el autor, tomado de (E. MONTES, 2023)

5.7.4. Procedimiento de Rosin-Rammler (Distribución de tamaños).

Según (E. MONTES, 2023):

La curva de Rosim Rammler, una herramienta fundamental en la ingeniería de procesos, proporciona un enfoque matemático para caracterizar la distribución granulométrica de materiales particulados. Al emplear una función lineal, esta curva permite modelar y ajustar los datos obtenidos experimentalmente.

Se puede decir que, en el ámbito de la industria, este modelo es particularmente adecuado para analizar la distribución de tamaños en la salida del molino, así como en el producto final del proceso, proporcionando una visión precisa de la eficiencia de la operación de trituración y molienda.

Procedimiento Rosin-Rammler

- Las muestras mineralizadas se sometieron 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.



Figura 24. Cuarteo del material

- 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 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.



Figura 25. Tamizador eléctrico

- 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, 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 trituration.

5.7.5. 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.

Paso 2: Establecimiento del Procedimiento

Se elaboró un procedimiento operativo estándar (SOP, por sus siglas en inglés) completo y minucioso 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.

- **Procedimiento Operativo Estándar (SOP)**

1) Preparación del Equipo y Materiales

2) Verificación del Molino de Bolas

En este segundo paso nos aseguramos de que se cumplan los siguientes parámetros:

- Limpieza: Verifique que el molino esté limpio, libre de residuos y materiales acumulados de procesos anteriores. Utilizando un cepillo y una manguera limpiar el interior del molino.
- Inspección de Bolas de Molienda: Examine las bolas de molienda para detectar desgaste, fisuras o deformaciones. Si es necesario reemplazar las bolas que se encuentren desgastadas, fisuradas o deformadas.
- Estado del Equipo: Inspeccione todas las conexiones eléctricas y mecánicas. Verifique también el estado de los rodamientos, correas, y sistemas de transmisión.

3) Recolección y Preparación de Muestras

- Recolección: Obtenga las muestras representativas del mineral a procesar, asegurándose de seguir un protocolo de muestreo y caracterización de las muestras.
- Secado: Si las muestras contienen humedad, séquelas en el horno hasta obtener un peso constante.

4) Equipos de Seguridad

EPP: Colóquese los Epp como son guantes de protección, protección auditiva (tapones) y, si es necesario, mascarilla para polvo y gafas de seguridad.

5) Carga del Molino de Bolas

Selección de la gradiente: Calcule y seleccione el tamaño y la cantidad de medio moledor, para luego introducirlo en el molino.

6) Carga de la Muestra de Mineral

- Pesaje: Pesar con precisión la muestra de mineral que se va a moler. Utilizando una balanza analítica y teniendo en cuenta que el molino trabaja con una capacidad mínima de carga de 3 kg.
- Carga: Introduzca la muestra de mineral en el molino de bolas con la ayuda de la tolva y la pala, esparciendo el material de manera uniforme sobre las bolas de molienda.

7) Operación del Molino de Bolas

Tiempo de Molienda: Determine el tiempo de molienda basado en la dureza del material y el tamaño de partícula deseado. Tiempo sugerido de molienda para material pasante malla 200 es de 2 horas.

8) Inicio del Proceso de Molienda

- Cierre del Molino: Con la ayuda de la llave de tubo nos aseguramos de que la tapa del molino esté bien cerrada y asegurada para evitar derramamientos.
- Encendido: Encienda el molino y observe su funcionamiento inicial para detectar ruidos anómalos o vibraciones inusuales.

9) Finalización del Proceso de Molienda

- Apagado: Apague el molino de bolas una vez alcanzado el tiempo de molienda programado y dejamos que el molino se estabilice y se asiente antes de abrir la tapa.

10) Descarga del Molino de Bolas

- Apertura: Abra la tapa del molino con cuidado para evitar la liberación de polvo.
- Separación: Retire las bolas usando la mano y lavándolas con la pipeta dentro del molino para así evitar la pérdida de material
- Secado: Coloque el molino con la boca hacia abajo para que caiga el material en el balde, luego divídalo en bandejas con cuidado para evitar la pérdida de material, lave con manguera el interior del molino para recolectar material pegado en las paredes, por último, lleve las bandejas dentro del horno para secarlas por completo.

11) Limpieza del Molino de Bolas

- Retiro de Residuos: Limpie el molino y las bolas de molienda, eliminando cualquier residuo de la muestra procesada. Utilice la manguera, un cepillo y un paño húmedo si es necesario.
- Revisión Final: Inspeccione el molino para asegurar que esté listo para su próximo uso.

12) Análisis de la muestra molida

- Granulometría: Realice un análisis granulométrico utilizando tamices de diferentes tamaños para determinar la distribución de tamaños de partícula metodología sugerida Rosin-Rammler.

- Otros Análisis: Si es necesario, realice otros análisis como por ejemplo químicos o mineralógicos adicionales.

13) Documentación

- Parámetros Operativos: Documente todos los parámetros utilizados durante el proceso (velocidad, tiempo de molienda, etc.).
- Observaciones: Registre cualquier observación relevante o anomalía detectada durante la operación.

14) Reporte de Resultados

Informe Detallado: Elabore un informe detallado con los resultados del proceso de molienda, incluyendo análisis granulométrico y cualquier otro análisis realizado.

Paso 3: Ejecución de los Ensayos

Los ensayos cuantitativos se llevaron a cabo siguiendo escrupulosamente el procedimiento previamente establecido. Durante esta etapa, se aplicaron rigurosamente las directrices definidas en el protocolo, asegurando la coherencia y la fiabilidad de los datos obtenidos a lo largo del proceso experimental. 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

5.7.6. Descripción de los ensayos realizados

- **Incidencia de la mineralización en los ensayos de molienda**

La mineralización del material tiene una incidencia crucial en los ensayos de molienda, afectando la eficiencia del proceso, el consumo de energía, el desgaste de los equipos y la calidad del producto final. Una comprensión y caracterización adecuadas de la mineralización permiten optimizar los parámetros de molienda y seleccionar estrategias adecuadas para mitigar sus efectos negativos, mejorando así el rendimiento global del proceso de molienda.

1) Caracterización Detallada del Mineral

Realizar una caracterización mineralógica detallada para entender la dureza, tenacidad, composición química y estructura cristalina del mineral. Técnicas como la difracción de rayos X (XRD) y la microscopía electrónica de barrido (SEM) son fundamentales.

2) Dureza y Tenacidad del Mineral

Eficiencia de Molienda: La dureza de un mineral, comúnmente medida por la escala de Mohs, influye directamente en la eficiencia de molienda. Minerales más duros, como el cuarzo (Mohs 7), requieren más energía para ser triturados que minerales más blandos, como la calcita (Mohs 3). La tenacidad, que es la resistencia del mineral a la fractura, también juega un papel importante. Por ejemplo, en la molienda de cuarzo de 20 kWh/t y molienda de calcita de 12 kWh/t se muestra que el cuarzo requiere aproximadamente un 66% más de energía para la molienda en comparación con la calcita.

3) Estructura Cristalina y Textura

Fragmentación y Reducción de Tamaño: La estructura cristalina afecta la manera en que los minerales se fragmentan durante la molienda. Minerales con estructuras cristalinas complejas pueden fragmentarse de manera desigual, afectando la distribución granulométrica del producto final. Por ejemplo, un mineral con alta anisotropía puede presentar una distribución de tamaño de partícula con una desviación estándar del 15%, comparado con un mineral isotrópico que presenta una desviación estándar del 10%.

4) Contenido de Impurezas y Minerales Asociados

Interferencias en la Molienda: La presencia de impurezas y minerales asociados puede afectar la eficiencia de molienda y aumentar el desgaste de los componentes del molino. Por ejemplo, la presencia de magnetita en un mineral de hierro puede incrementar el desgaste de las bolas de molienda y los revestimientos.

5) Composición Química

Reactividad Química: La composición química del mineral puede influir en su reactividad durante la molienda. Minerales que reaccionan químicamente con el medio de molienda pueden alterar la eficiencia del proceso y la calidad del producto. Por ejemplo, un mineral con alto contenido de sulfuro puede formar ácido sulfúrico, incrementando los costos de mantenimiento hasta en un 10% debido a la corrosión de los componentes del molino.

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:

- a) 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.
- b) 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.

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 (mayor a 3kg)
- 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 (tabla 11 y 29) 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.
- 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.

Tabla 11. *Condiciones experimentales para ensayos de validación*

CONDICIONES EXPERIMENTALES	
Gradiente de Bolas	0.70 – 3.5
Tiempo de Molienda	1 hora – 2 horas
Carga del material a moler	3kg mínimo
Relación agua / material	Cualquier variante
Dimensión F80	3328 micras
Número de tamices para ensayo	40 – pasante 200

Ensayo 3: Medición nivel de ruido

- 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 decibeles (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 y 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 y 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.

6. Resultados

Los resultados del proyecto de Tesis se describen a continuación en función de cada objetivo realizado.

6.1. Resultados del primer objetivo

“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.”

6.1.1. *Cálculos de las variables, parámetros y características*

- Características específicas

Para el cálculo según (Amores Balseca & Maldonado Bernabé, 2019) los molinos se pueden clasificar de acuerdo con su uso:

- Si los molinos son para aleaciones aplicaciones, la relación L/D corta es de 1 a 2 para limitar la producción de finos que consumen mucha energía.
- Cuando las bolas son mayores a 60 mm, los forros de caucho disminuyen la potencia y se deterioran de forma rápida.
- Utilizar en la molienda húmeda un 55% y 70 en % de líquido.
- **Tambor**

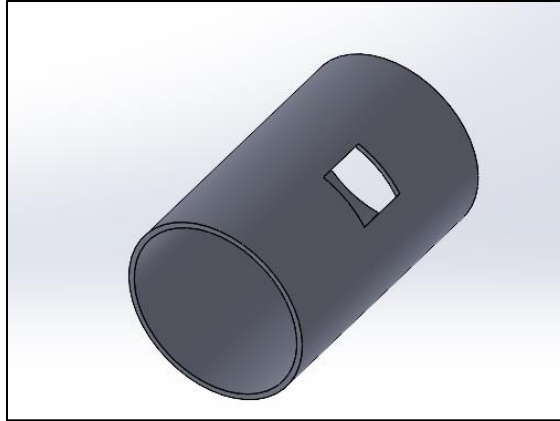


Figura 26. Tambor

Se inició con la parte más importante de la máquina el cual es el tambor, este fue pensado y diseñado para moler una cantidad de material mayor a 3 kg.

- El diseño de mi molino de bolas con una capacidad mínima de 3 kg se fundamenta en la necesidad de realizar ensayos y pruebas iniciales que sean representativos y significativos para el proceso de molienda. Esta capacidad asegura que pueda manejar cantidades adecuadas de material para obtener resultados precisos y reproducibles, esenciales en la investigación y desarrollo de nuevos procesos industriales. Además, permite ajustar y optimizar las condiciones de operación del molino, como la carga de bolas y la velocidad de rotación, de manera efectiva, asegurando así que los datos obtenidos durante las pruebas sean confiables y útiles para la escalabilidad del proceso a niveles industriales.

El material del tambor es un tubo de vapor para oleoductos 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**

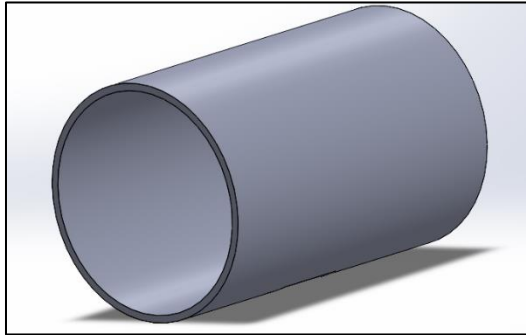


Figura 27. *Tambor y espesor*

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 riguroso análisis, se estableció que un grosor de 12 mm resultaba óptimo desde una perspectiva económica y técnica.

Esta decisión se basó en varias razones técnicas como integridad estructural, durabilidad, rendimiento en molienda y seguridad. En primer lugar, un grosor de 12 mm 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.

Considerando aspectos económicos y de eficiencia, un grosor mayor aumentaría los costos de fabricación y el peso del tambor, mientras que un grosor menor comprometería la integridad estructural del equipo.

- **Volumen real del tambor**

$$Vm = \frac{\pi * D^2 * L}{4}$$

Donde:

Vm: m³

D: Diámetro en m

L: longitud en m

$$Vm = \frac{\pi * 0.32^2 * 0.52}{4}$$

$$Vm = 0.041 \text{ m}^3$$

- **Dimensionamiento de las tapas del tambor**

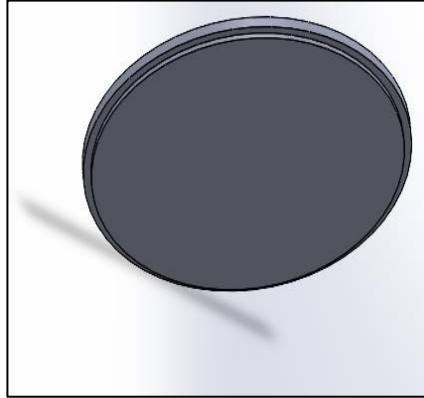


Figura 28. Tapa de tambor

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

$$Dt = D + 2f$$

Donde:

Dt: diámetro de las tapas del tambor en m.

D: diámetro interior del tambor en m.

f: espesor en m.

$$Dt = 0.29 + 2 * 0.015$$

$$Dt = 0.32 \text{ m} = 32 \text{ cm}$$

- **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:

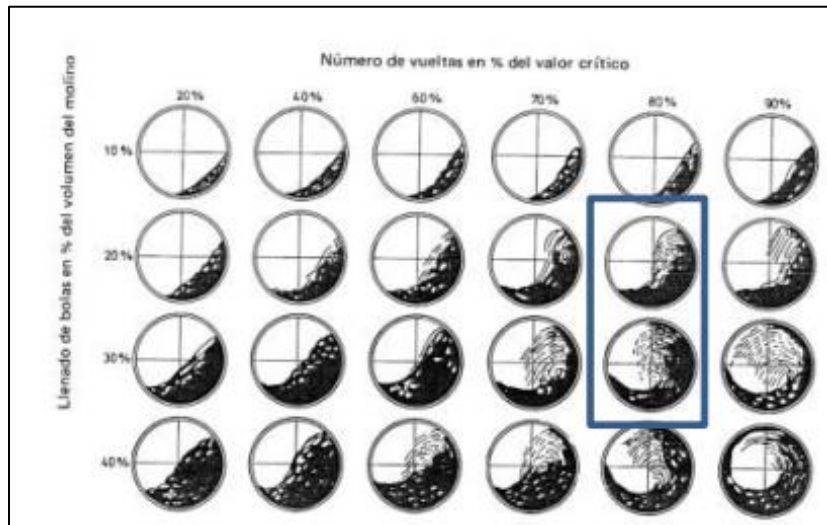


Figura 29. Grado de llenado

Nota. (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. Esta combinación según pruebas parece ofrecer una capacidad de respuesta óptima para lograr el sistema deseado.

- **Cálculo del porcentaje de llenado**

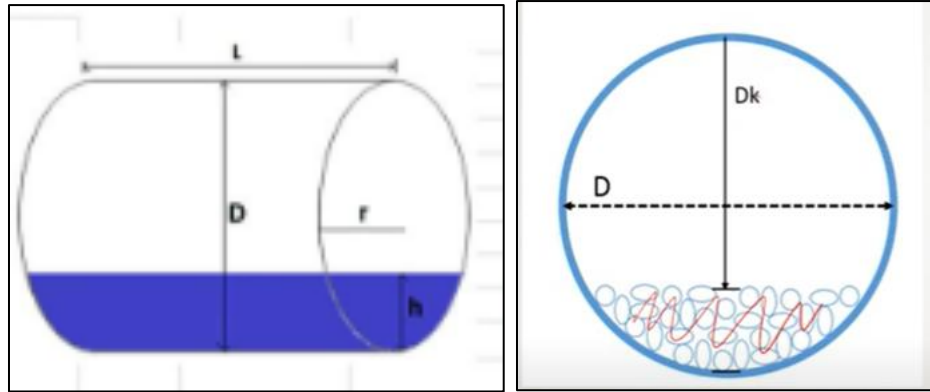


Figura 30. Variables interiores del molino
Nota. (Cevallos Villavicencio & Caiza López, 2019)

Para el cálculo del porcentaje de llenado, primero debemos determinar las variables D y Dk, indicadas en la gráfica anterior, para lo cual se lo realizó de la siguiente manera.

- D: Se lo midió con el molino vacío desde la base de la cámara interior molienda hasta la boca de entrada

$$D = 30 \text{ cm}$$

- DK: Se colocó las bolas dentro del molino y utilizando un flexómetro medimos la distancia hasta la boca de entrada tomando en total 4 medidas de extremo a extremo y se obtuvo un promedio.

Tabla 12. Cálculo Dk

Volumen del cilindro	44475.53	cm³
Área de la base	855.30	cm ²
DK	21	cm
	20.5	cm
	21	cm
	20.5	cm
Total, DK	21	cm
Radio	16.5	

Luego, se calculó el % de llenado con la fórmula de la tabla 4.

$$\% \text{ de Llenado} = 113 - 126 * \left(\frac{21}{30}\right)$$

% de Llenado = 26%

- Datos generales del molino**

Tabla 13. Datos generales del molino

DATOS DEL MOLINO		
LARGO	52	cm
DIÁMETRO	33	cm
VOLUMEN REAL	0.041	cm ³
VELOCIDAD CRÍTICA	73.125	rpm
DK	21	cm
D	30	cm
%C DE LLENADO	26	%
MB MASA DE BOLAS	0.061 tn	60.657 kg
VOLUMEN DEL CILINDRO	44475.53	cm ³
ÁREA DE LA BASE	855.30	cm ²
RADIO	16.5	cm

- Gradiente de molienda**

Tabla 14. Gradiente para el molino de bolas

Gradiente	Bola (in)	Tamaño de bola intermedio	%DB	%Retenido
Tamaño de bola óptimo (X _o) in	3.5	1.87	8.03	91.97
Tamaño de bola final (X _f) in	0.68	1.22	1.36	6.67
Masa de bolas (kg)	1	0.82	0.17	1.19
	0.68	0.68	0.00	0.17
			TOTAL	99.83

- Potencia teórica necesaria**

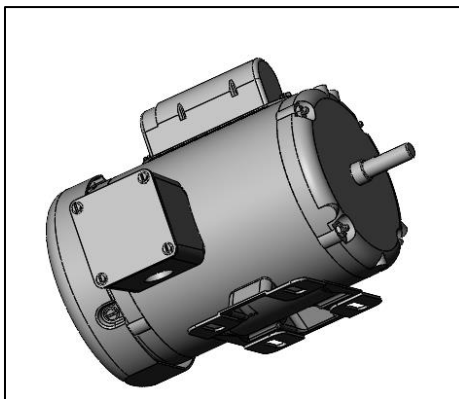


Figura 31. Motor

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

$$Pt = 12.5.H$$

Dónde:

Pt: potencia teórica necesaria en CV

H: peso neto total de la carga [ton].

Tabla 15. Relación entre elementos y su peso

Elemento	Cantidad	Peso (Kg)	Total (kg)
Peso de las bolas	1	5	5
Material a moler	1	3	3
Tambor	1	15	15
Tapas del tambor	2	1.5	3
50% molienda húmeda	1	20.5	20.5
7 % adicional del peso de soldadura del tambor	1	1	1
Total (H)			47.5 kg (0.0475 ton)

$$Pt = 12.5 * 0.0475 \text{ ton}$$

$$Pt = 0.60 \text{ CV}$$

$$Pt = 0.59 \text{ HP}$$

- **Potencia real necesaria**

Entonces, 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.

$$P = Pt + 20\% * Pt$$

$$P = 0.59 + 0.118$$

$$P = 0.708 \text{ HP}$$

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.

6.1.2. 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.

La transmisión por banda tiene las siguientes características:

- Menos demanda de potencia: Las transmisiones por banda pueden ser adecuadas para transmitir la potencia necesaria en estos casos sin sobrecargar el equipo.
- Flexibilidad y absorción de choque: En entornos de laboratorio, donde las condiciones pueden variar y se realizan pruebas o experimentos que generan cambios en la carga, las bandas pueden ser más flexibles y capaces de absorber estos cambios repentinos sin dañar el equipo.
- Menor costo y facilidad de mantenimiento: Las bandas de transmisión son relativamente económicas y fáciles de reemplazar en comparación con sistemas más complejos. Para un molino de bolas de laboratorio, donde la operación es intermitente y no continua, este tipo de transmisión puede ofrecer un buen equilibrio entre costo y rendimiento.
- Menor ruido y vibración: Las bandas pueden reducir el ruido y la vibración en comparación con algunos otros sistemas de transmisión. En un entorno de laboratorio, donde se valora la precisión y la estabilidad en las mediciones, esto puede ser beneficioso.

Llegando a la conclusión de que se va a utilizar una transmisión por banda.

El sistema de transmisión va a funcionar 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.

6.1.3. Análisis y Justificación 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

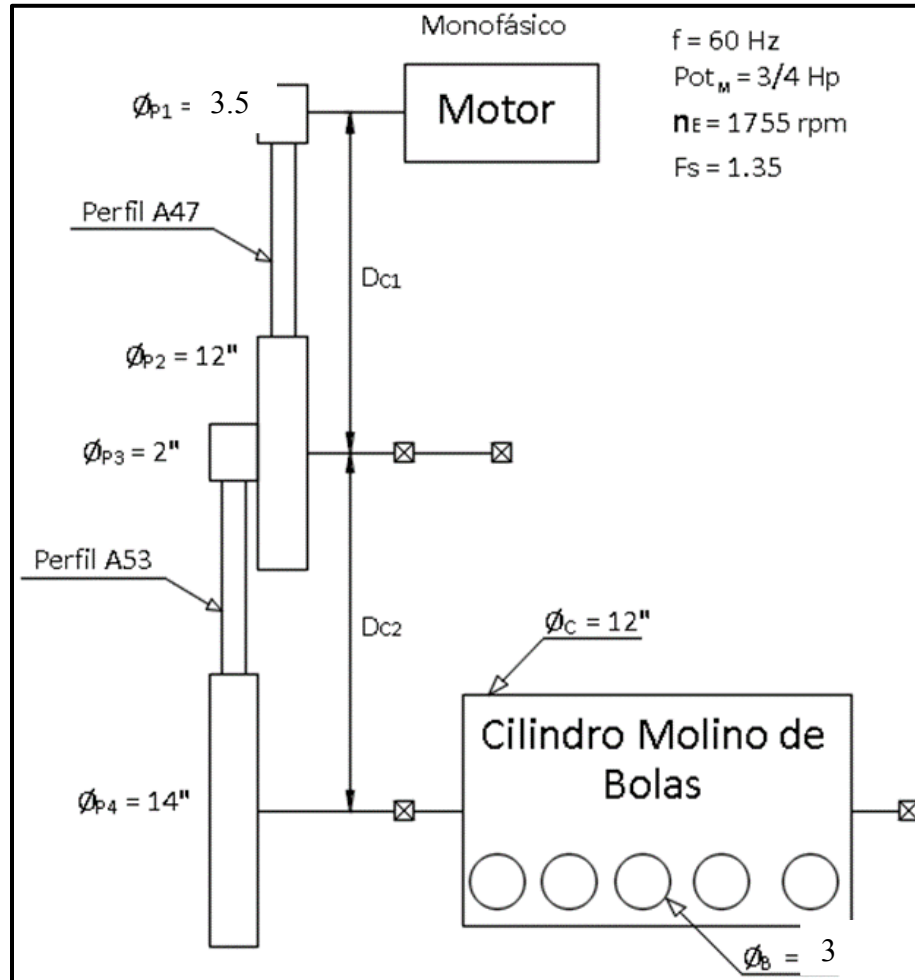


Figura 32. Diseño de transmisión

- **Determinación de la Velocidad Crítica del Molino de Bolas**

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

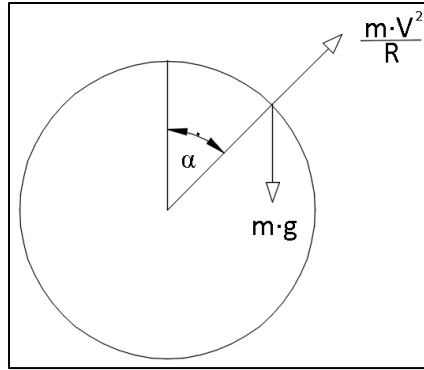


Figura 33. Diagrama cinemático de velocidad crítica del molino

Este diagrama indica las fuerzas a las que están sometidas las bolas de acero dentro del cilindro. Fue diseñado con el software AutoCAD.

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. Todo esto se determinó con la siguiente fórmula:

$$\frac{m \cdot V^2}{R} = m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$$

$$\frac{V^2}{R} = g ; V = n_c \cdot R \cdot \frac{\pi}{30}$$

$$\frac{(n_c \cdot \pi \cdot R/30)^2}{R} = g ; R = \frac{\phi_C - \phi_B}{2}$$

$$n_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{\phi_C - \phi_B}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2(32,174 \text{ ft/s}^2)}{1 \text{ ft} - 1/3 \text{ ft}}} = \mathbf{93,8176 \text{ rpm}}$$

Atendiendo a la recomendación de 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**

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

$$= \frac{\phi_{P1}}{\phi_{P2}} \cdot \frac{\phi_{P1}}{\phi_{P2}} = \frac{12''}{3.5''} \cdot \frac{14''}{2''} = 24$$

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

$$n_S = \frac{n_E}{i_T} = \frac{1755 \text{ rpm}}{24} = 73.125 \text{ rpm}$$

Comprobación de que el Torque efectuado 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 trapezoidales η_C en la segunda transmisión de potencia. Según Dobrovolski, V. (1980) sugiere que “Las perdidas ... en una transmisión por correa trapezoidal, 4%” (p. 202).

$$Pot_{D1} = Pot_M \cdot Fs_1 = 0,75 \text{ Hp} \cdot 1,35 = 1,0125 \text{ Hp} = 755,0213 \text{ W}$$

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

$$\tau_S = \frac{Pot_{D1} \cdot \eta_C^2}{\omega_4} = \frac{755,0213 \text{ W} \cdot 0,96^2}{6,5637 \text{ rad/s}} = 106,0117 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- **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 %”.

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

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

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.

$$V_B = 10 \left(\frac{4}{3} \pi \cdot r_B^3 \right) = \frac{4}{3} \pi \cdot (2 \cdot 0,0254 \text{ m})^3 = 0,0055 \text{ m}^3$$

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 porciento, 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.

Se calculó el volumen máximo que debería tener el material rocoso V_M , mediante la siguiente ecuación.

$$V_M = 0,7V_p = 0,0135 \text{ m}^3 = \mathbf{0,0094 \text{ m}^3}$$

Se calculó el volumen máximo que debería tener el agua V_A , mediante la siguiente ecuación.

$$V_A = 0,3V_p = 0,3 \cdot 0,0135 \text{ m}^3 = \mathbf{0,0031 \text{ m}^3}$$

- **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/m³ (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/m³ según (Dana, J. D., Hurlbut, C. S. y Klein C., 1981, p. 556). Y el peso específico del agua es de 9810 N/ m³.

$$F_T = \gamma_M \cdot V_M + \gamma_B \cdot V_B + \gamma_A \cdot V_A$$

$$F_T = \left[\left(27173,7 \frac{N}{m^3} \right) (0,0094 m^3) + \left(77106,6 \frac{N}{m^3} \right) (0,0055 m^3) + \left(9810 \frac{N}{m^3} \right) (0,0031 m^3) \right]$$

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

- **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.

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

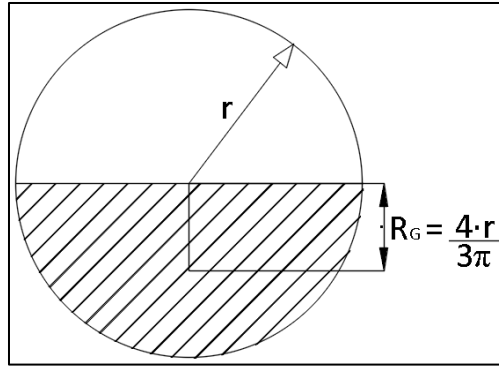


Figura 34. Diagrama para cálculo del torque máximo

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

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

$$\tau_A = 63,2485 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Se seleccionó un factor de servicio recomendado para la máquina como se observa:

Tipo de máquina conductora Tipo de máquina conducida	Motores de corriente alterna, torque normal, a jaula de ardilla, sincrónicos; fase partida. Motores de corriente continua, bobinado en shunt. Máquinas de combustión interna, cilindros múltiples.			Motores de corriente alterna, con torque de desluzamiento, bobinado en serie y anillado colector. Motores de corriente continua, bobinado en serie y bobinado compound. Máquina a combustión interna, monocilíndrica. Ejes en línea. Arranque directo y con embrague		
	Servicio intermedio hasta 7 horas diarias	Servicio normal 8 a 15 horas diarias	Servicio continuo más de 16 horas diarias	Servicio intermedio hasta 7 horas diarias	Servicio normal 8 a 15 horas diarias	Servicio continuo más de 16 horas diarias
Agitador para líquidos y semilíquidos, ventiladores y aspiradores, compresores y bombas centrífugas. Sopladores hasta 10 HP. Transportadores livianos.	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Cintas transportadoras para arena, granos, etc. Mezcladores de panadería. Sopladores de más de 10 HP, generadores. Línea a ejes (ejes principales), máquinas de lavaderos, máquinas herramienta, punzadoras, prensa, guillotinas, bombas rotativas positivas. Máquinas de imprenta, zarandas vibradoras y giratorias.	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Máquina de ladrillos y cerámicas, elevadores a cangilones. Generadores y excitatrices. Compresores a pistón, transportadores, molinos a martillos, molinos batidores para papel, bombas a pistón, sopladores positivos. Pulverizadores, desmenuzadoras, sierras y máquinas para elaboración de madera, máquinas textiles.	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
Trituradoras (giratorias, mandíbulas, bolas). Molinos (bolas, laminadores, barras). Calamandra para goma, bambury-extrusoras.	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8

Figura 35. Factor de servicio utilizado en molino de bolas

Nota. (Cabezas Casco, 2017)

Este es el factor de servicio seleccionado para la máquina trituradora tipo molino de bolas con motor de corriente alterna asíncrono

Por último, obtenemos 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.

$$Pot_{D2} = \frac{\tau_A \cdot \omega_4}{\eta_c^2} \cdot Fs_2 = \frac{63,2485 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 6,5637 \text{ rad/s}}{0,96^2} \cdot 1,5 = \mathbf{0,9061 \text{ Hp}}$$

Transmisión

- **Determinación del Diámetro entre Centros de la Primera Transmisión**

Primero se analizó la cantidad de variables que podemos obtener del diagrama de cuerpo libre de la primera transmisión de potencia por correas trapecoidales como se observa en la figura.

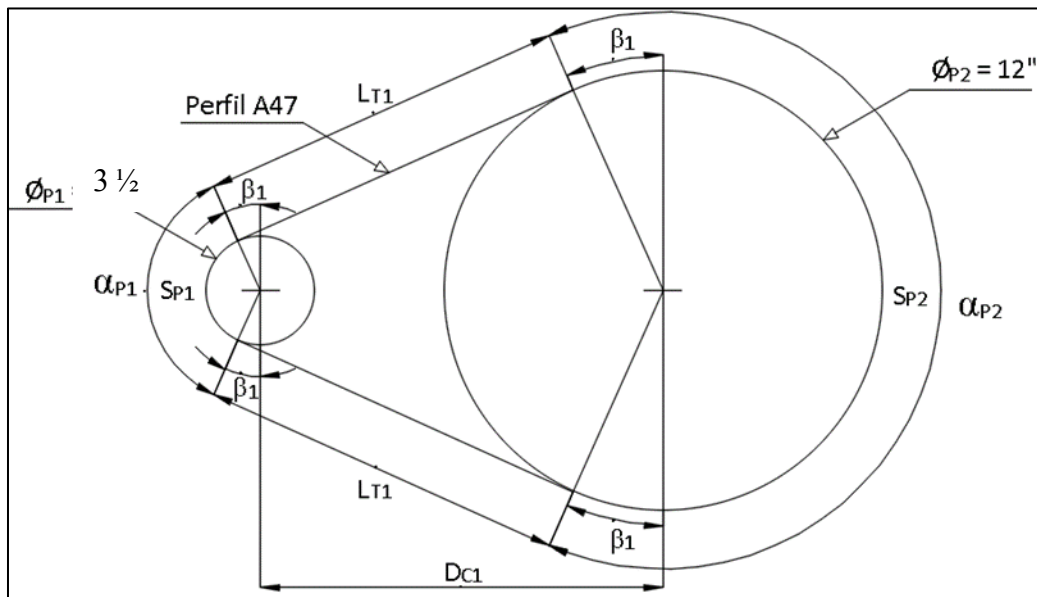


Figura 36. Diagrama de la transmisión

Este diagrama nos indica los parámetros que tiene una transmisión de potencia por correas.

Diseñado con el software AutoCAD

Para determinar el diámetro entre centros de la primera relación de transmisión de potencia $DC1$ se relacionó todas las ecuaciones mediante una variable en común que es beta uno β_1 .

Primero relacionamos el diámetro entre centros de la primera transmisión de potencia $DC1$ con el ángulo beta uno β_1 mediante la siguiente ecuación.

$$\beta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{\phi_{P2} - \phi_{P1}}{2 \cdot DC1} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{12'' - 3''}{2 \cdot DC1} \right)$$

$$DC1 = \frac{4,5''}{\sin \beta_1}$$

Después procedemos a determinar el ángulo de contacto entre la polea conductora y la correa de la primera relación de transmisión de potencia α_{P1} en términos de beta uno β_1 .

$$\alpha_{P1} = \pi - \pi \cdot \frac{\beta_1}{90}$$

Y también determinamos el ángulo de contacto entre la polea conducida y la correa de la primera relación de transmisión de potencia α_{P2} en términos de beta uno β_1 .

$$\alpha_{P2} = \pi + \pi \cdot \frac{\beta_1}{90}$$

Obtenemos el arco de contacto entre la polea conductora y la correa de la primera relación de transmisión de potencia S_{P1} en términos de beta uno β_1 .

$$S_{P1} = \frac{\alpha_{P1} \cdot \phi_{P1}}{2} = \frac{(\pi - \pi \cdot \beta_1/90) \cdot 3''}{2} = 1,5\pi - \pi \cdot \frac{\beta_1}{60}$$

Y también obtenemos el arco de contacto de la polea conducida de la primera relación de transmisión de potencia S_{P2} en términos de beta uno β_1 .

$$S_{P2} = \frac{\alpha_{P2} \cdot \phi_{P2}}{2} = \frac{(\pi + \pi \cdot \beta_1/90) \cdot 12''}{2} = 6\pi + \pi \cdot \frac{\beta_1}{15}$$

Se procede a expresar la longitud de tramo recto de la primera relación de transmisión de potencia L_{T1} en términos de beta uno β_1 .

$$L_{T1} = D_{C1} \cdot \cos \beta_1 = \frac{4,5''}{\sin \beta_1} \cdot \cos \beta_1 = \frac{4,5''}{\tan \beta_1}$$

Por último, relacionamos todas las ecuaciones anteriormente despejadas en función de beta uno β_1 para poder obtener una ecuación en términos únicamente de beta uno β_1 , ya que sabemos que la longitud de la correa trapezoidal de la primera transmisión de potencia es 47 pulgadas tipo perfil A.

$$L_{C1} = 47'' = S_{P1} + S_{P2} + 2 \cdot L_{T1} = 1,5\pi - \pi \cdot \frac{\beta_1}{60} + 6\pi + \pi \cdot \frac{\beta_1}{15} + 2 \cdot \frac{4,5''}{\tan \beta_1}$$

$$\beta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{9}{47 - 7,5\pi - \pi \cdot \beta_1/20} \right)$$

La anterior ecuación nos sirve para aplicar el método numérico de iteración simple utilizando la ecuación de error aproximado para obtener la constante de beta uno β_1 lo más precisa posible.

$$\varepsilon_a = \frac{\beta_{i+1} - \beta_i}{\beta_{i+1}}$$

Al aplicar el método numérico de iteración simple en la ecuación 13 se obtiene un resultado de beta uno β_1 de 24,7124 grados, por lo que procedemos a calcular el diámetro entre centros de la primera transmisión de potencia D_{C1} mediante la ecuación 6.

$$D_{C1} = \frac{4,5''}{\sin \beta_1} = \frac{4,5''}{\sin(24,7124^\circ)} = 10,7639''$$

A la vez podemos determinar el valor del ángulo de contacto entre la polea conductora y la correa de la primera transmisión de potencia α_{P1} .

$$\alpha_{P1} = \pi - \pi \cdot \frac{\beta_1}{90} = 2,279 \text{ rad} = 130,5752^\circ$$

Y también, calculamos el ángulo de contacto entre la polea conducida y la correa de la primera transmisión de potencia α_{P2} , mediante la ecuación 8.

$$\alpha_{P2} = \pi + \pi \cdot \frac{\beta_1}{90} = 4,0042 \text{ rad} = 229,4248^\circ$$

- **Determinación del Número de Correas Trapezoidales de la Primera Transmisión**

Procedemos a realizar el cálculo de la primera relación de transmisión de potencia i_1 cómo se observa en la siguiente ecuación.

$$i_1 = \frac{\phi_{P2}}{\phi_{P1}} = \frac{12''}{3''} = 4$$

Mediante las dimensiones de la correa trapezoidal (Figura 4) procedemos a calcular el área de la correa A_c como se observa en la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} A_c &= b \cdot h - b^2 \cdot \tan(20) = 1/2'' \cdot 5/16'' - (5/16'')^2 \cdot \tan(20) \\ &= 77,8747 \mu m^2 \end{aligned}$$

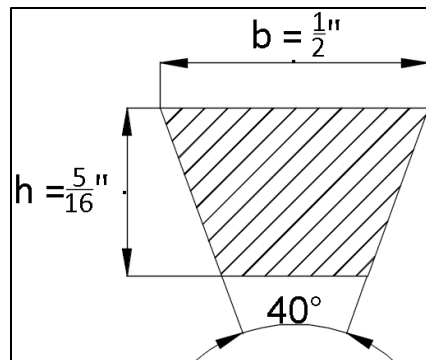


Figura 37. Diagrama cinemático del área de la banda o correa trapezoidal

Nota. (C. Mora, 2022)

Este diagrama nos indica las dimensiones que tiene una correa trapezoidal perfil A.

Calculamos el rpm angular en la polea conductora de la primera transmisión de potencia ω_{P1} , como se observa a continuación.

$$\omega_{P1} = \frac{n_1 \cdot \pi}{30} = \frac{1755 \text{ rpm} \cdot \pi}{30} = 183,7832 \text{ rad/s}$$

Mediante la velocidad angular calculada procedemos a obtener la velocidad lineal de la correa trapezoidal de la primera transmisión de potencia V_{L1} , se observa a continuación su desarrollo.

$$V_{L1} = \frac{\omega_{P1} \cdot \phi_{P1}}{2} = \frac{183,7832 \text{ rad/s} \cdot 3''}{2} = 7,0021 \text{ m/s}$$

Procedemos a calcular la masa lineal de la correa trapezoidal m_L perfil A DIN 2215 / ISO 4184. Según Optibelt: Technical Manual V-Belt Drives “el peso lineal de este tipo de correa es de 0,109 kgf/m”.

$$m_L = \frac{\rho}{g} = \frac{0,109 \text{ kgf/m}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 0,109 \text{ kg/m}$$

Mediante los anteriores cálculos de la velocidad lineal de la primera transmisión de potencia y de la masa lineal podemos obtener la fuerza centrífuga de la correa de la primera transmisión de potencia F_{c1} mediante la siguiente ecuación.

$$F_{c1} = m_L \cdot V_{L1}^2 = 0,109 \text{ kg/m} \cdot (7,0021 \text{ m/s})^2 = 5,3442 \text{ N}$$

Para calcular la tensión inicial en la correa trapezoidal F_i procedemos a utilizar la ecuación 20 como se describe a continuación. Según Dobrovolski (1991), “no es racional aumentar la tensión inicial por encima del valor del esfuerzo inicial de 12 kgf/cm² para correas trapezoidales” (p. 264).

$$F_i = \sigma_i \cdot A_C = 1,1772 \text{ MN/m}^2 \cdot 77,8747 \mu\text{m}^2 = 91,6741 \text{ N}$$

Mediante la siguiente ecuación podemos obtener la fuerza de tracción máxima a la que está sometida la correa de la primera transmisión de potencia F_1 . Trabajamos con el ángulo de contacto menor de la primera transmisión de potencia. Según la Gates Rubber Company “su coeficiente de fricción efectivo f' es de 0.5123 para ranuras”.

$$F_1 = F_{c1} + F_i \cdot \frac{2 \cdot e^{0,5123 \cdot \alpha}}{e^{0,5123 \cdot \alpha} + 1}$$

$$F_1 = 5,3442 \text{ N} + 91,6741 \text{ N} \cdot \frac{2 \cdot e^{0,5123 \cdot 2,279}}{e^{0,5123 \cdot 2,279} + 1} = 145,1836 \text{ N}$$

También procedemos a calcular la fuerza de tracción mínima a la que está sometida la correa de la primera transmisión de potencia F_2 .

$$F_2 = F_{c1} + F_i \cdot \frac{2}{e^{0,5123 \cdot \alpha} + 1}$$

$$F_2 = 5,3442 \text{ N} + 91,6741 \text{ N} \cdot \frac{2}{e^{0,5123 \cdot 2,279} + 1} = 48,853 \text{ N}$$

Mediante las fuerzas de tracción sobre la correa antes calculadas, se procede a calcular la fuerza tangencial o periférica de la primera transmisión de potencia F_{T1} , con la siguiente ecuación.

$$F_{T1} = F_1 - F_2 = 145,1836 \text{ N} - 48,853 \text{ N} = 96,3306 \text{ N}$$

Procedemos a calcular la potencia a la que está sometida cada correa de la primera transmisión de potencia Pot_{C1} .

$$Pot_{C1} = F_{T1} \cdot V_{L1} = 96,3306 \text{ N} \cdot 7,0021 \text{ m/s} = 674,5165 \text{ W} \\ = 0,9045 \text{ Hp}$$

Y obtenemos el número de correas que se necesitaría en la primera transmisión de potencia Z_{C1} .

$$Z_{C1} = \frac{Pot_{D2}}{Pot_{C1}} = \frac{0,9061 \text{ Hp}}{0,9045 \text{ Hp}} = 1,0018 \approx \mathbf{1 \text{ correa o banda}}$$

6.2. Resultados del segundo objetivo

“Construir el molino de bolas a partir de las variables y parámetros deseados.”

6.2.1. Diseño y construcción del molino de bolas

- Cámara de molienda



Figura 38. Cámara de molienda

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 solda autógena dándonos como resultado un cilindro con tapas de medidas 52 cm de largo y 33 cm de diámetro.

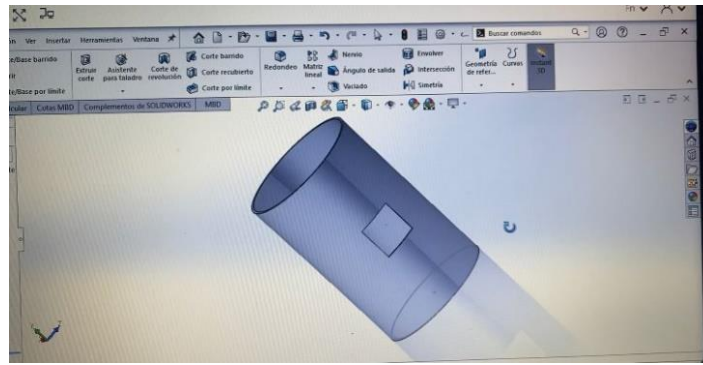


Figura 39. Cámara de molienda diseño final

- **Ejes del cilindro**



Figura 40. Ejes y tapas del cilindro

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.



Figura 41. *Ejes y cámaras de molienda*

- **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 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.



Figura 42. Seguro del molino

- **Mesa**

Como siguiente paso después de tener el cilindro, se procedió a construir la mesa cuadrada donde se asentaría el futuro molino de bolas. 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, ya que este proceso es crucial para lograr estabilidad y evitar movimientos durante el proceso de molienda.



Figura 43. Mesa de tubo cuadrado

- **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.



Figura 44. Polea principal y montaje de la cámara de molienda

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



Figura 45. *Polea secundaria*

- **Preparación del motor**



Figura 46. *Base del motor y montaje de la polea*

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 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.

Al motor se le conectó la conexión para que pudiera trabajar a 220V, y se atornilló una botonera en la pata paralela al motor.



Figura 47. *Montaje del motor y la botonera*

- **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 1/2" y 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 1/2" y 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.



Figura 48. Tolva con bandeja para la caída del material

6.2.2. Diseño en software Solidwoks y Molino de bolas construido

Figura 49. Diseño del molino de bolas en software Solidworks

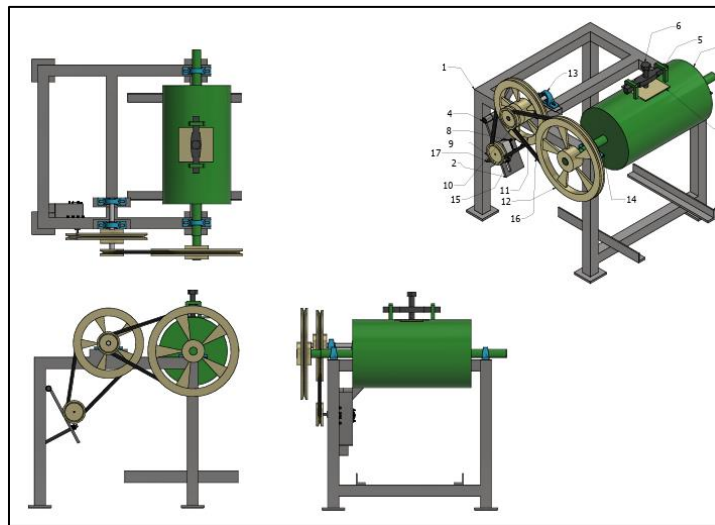


Figura 50. Diseño del molino de bolas en software Solidworks



Figura 51. Molino de bolas

6.3.Resultados del tercer objetivo

Para los ensayos de molienda, se recolectaron cuatro muestras de 6 kg aproximadamente procedentes de la región Sur del Ecuador. Estas muestras fueron sometidas previamente a un proceso de caracterización, el cual incluyó la evaluación minuciosa de sus propiedades índice. Este análisis preliminar fue llevado a cabo antes de proceder con las pruebas y ensayos de molienda en el laboratorio de la universidad.

6.3.1. Descripción de las muestras

Tabla 16. Datos generales Muestra 1

Muestra 1	Provincia: Zamora Chinchipe
	Lugar: Chinapinza
	Sociedad: El mirador
	Tipo de roca: Cuarzodiorita

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. La presencia de estos minerales indica un origen ígneo para la cuarzodiorita, probablemente relacionado con procesos de intrusión magmática en la corteza terrestre.

Tabla 17. Datos generales Muestra 2

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

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 feldespato y biotita. Esta brecha andesítica puede haber experimentado procesos de fracturamiento y cementación posterior, lo que pudo haber influido en su textura y características petrográficas.

Tabla 18. Datos generales Muestra 3

Muestra 3	Provincia: Azuay
	Lugar: Santa Isabel

Tipo de roca: Roca andesita

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. Se visualiza una alteración de grado medio provocado por procesos hidrotermales o metamórficos posteriores en la roca.

6.3.2. Resultados obtenidos de las propiedades índice de las muestras.

Tabla 19. Datos obtenidos para el cálculo de las propiedades índice de las muestras

Número	Lugar	Muestras						
		w= peso	wsaturado	wsumergido	wseco	W2	w1	wpulverizada
1	Chinapinza	575.76	579.84	367.52	571.17	147.2	166.51	30
2	Torata	164.82	168.05	102.96	163.83	147.2	166.4	30
3	Santa Isabel	546.36	561.4	343	544.34	147.2	166.99	30

Tabla 20. Propiedades índices de la muestra 1 Chinapinza

Muestra 1		Provincia: Zamora Chinchipe
		Lugar: Chinapinza
Contenido de humedad		0.80
Porosidad eficaz		4.08
Peso específico aparente		2.68
Peso específico real		2.80
Porosidad		4.14
Porosidad cerrada		0.06
Coefficiente de absorción		1.52
Compacidad		95.86
Módulo de saturación		98.6




Tabla 21. Propiedades índices de la muestra 2 Torata

Muestra 2		Provincia: El Oro
		Lugar: Torata
Contenido de humedad		0.60
Porosidad eficaz		6.48
Peso específico aparente		2.51
Peso específico real		2.77



Porosidad	9.39
Porosidad cerrada	2.91
Coefficiente de absorción	2.58
Compacidad	90.61
Módulo de saturación	69.1

Tabla 22. *Propiedades índice muestra 3 Santa Isabel*

Muestra 3		Provincia: Azuay
		Lugar: Santa Isabel
Contenido de humedad	0.37	
Porosidad eficaz	7.81	
Peso específico aparente	2.49	
Peso específico real	2.93	
Porosidad	15.18	
Porosidad cerrada	7.36	
Coefficiente de absorción	3.13	
Compacidad	84.82	
Módulo de saturación	51.5	



- **Incidencia del contenido de humedad**

- 1) Agregación y Adhesión

Agregación de partículas: Un contenido elevado de humedad puede provocar que las partículas del material se agreguen entre sí debido a la formación de puentes líquidos, generando conglomerados que dificultan la molienda eficiente.

Adhesión a las bolas y revestimientos: Las partículas húmedas pueden adherirse a las superficies de las bolas de molienda y a los revestimientos del molino, formando una capa de material pegajoso que reduce el contacto efectivo entre las bolas y el material a moler.

- 2) Reducción de la Eficiencia de Molienda

Eficiencia de la molienda: La aglomeración y adhesión de partículas debido a la humedad reduce la eficiencia de la molienda, ya que disminuye el área superficial disponible para la interacción bola-partícula, resultando en una menor tasa de reducción de tamaño.

Efecto sobre la cinética de molienda: La presencia de agua puede alterar la cinética de molienda al cambiar la dinámica de colisión entre las bolas y las partículas. Esto puede llevar a una distribución granulométrica menos uniforme.

- Un estudio realizado por Gupta y Sharma (2014) analizó la eficiencia de molienda en un molino de bolas para diferentes niveles de humedad del material (caliza) y encontró los siguientes resultados:

Tabla 23. Ejemplo humedad/reducción de tamaño

Humedad del material (%)	% Pasante por Tamiz de 200 mallas
1%	85%
5%	78%
10%	65%
15%	50%

Los datos muestran que a mayor humedad reduce la finura del producto final, evidenciando una distribución granulométrica más gruesa.

3) Problemas de Transporte y Alimentación

Alimentación del molino: Un material con alto contenido de humedad puede obstruir los sistemas de transporte y alimentación del molino, provocando interrupciones en el flujo de material y reduciendo la eficiencia operativa del molino.

Movimiento del material: La humedad puede incrementar la viscosidad del material, dificultando su movimiento dentro del molino y afectando negativamente la eficiencia de la molienda.

4) Generación de Pasta

Formación de lechos viscosos: Con altos niveles de humedad, el material puede formar una pasta densa dentro del molino, lo que impide el movimiento libre de las bolas de molienda y reduce drásticamente la eficiencia del proceso.

Efecto sobre la capacidad del molino: La formación de pasta reduce la capacidad efectiva del molino al disminuir el volumen disponible para la carga de material y bolas de molienda.

6.3.3. *Granulometría de Rosin-Rammler previo a la molienda.*

Tabla 24. Resultados del tamizaje Chinapinza

CHINAPINZA	TAMIZADOR TIEMPO	6 MIN
TAMICES	peso retenido primera parte (gr)	peso retenido segunda parte (gr)
3/8	0	0

¼	3.13	3.35
4	69.6	29.28
8	958.77	377.57
10	96.25	39.85
16	316.92	95.48
20	143.54	38.07
30	118.9	31.5
40	107.58	29.86
60	123.78	32.9
100	90.65	30.25
200	82.39	31.89
PASANTE 200	68.25	19.09
SUBTOTAL	2179.76	759.09
	Total	2938.85
	Peso inicial	2938.9

Tabla 25. *Resultados del tamizaje Torata*

TORATA	TAMIZADOR TIEMPO	6 MIN
TAMICES	peso retenido primera parte (gr)	peso retenido segunda parte (gr)
3/8	0	0
1/4	2.17	0.87
4	47.45	46.3
8	699.66	698.43
10	96.6	85
16	274.18	212.86
20	106.5	77.08
30	91.45	64.59
40	86.29	58.81
60	101.91	69.9
100	80.75	53.37
200	71.3	55.03
PASANTE 200	114.6	82.01
SUBTOTAL	1772.86	1504.25
	Total	3277.11
	Peso inicial	3277

Tabla 26. *Resultados del tamizaje Santa Isabel*

SANTA ISABEL	TAMIZADOR TIEMPO	6 MIN
TAMICES	peso retenido primera parte (gr)	peso retenido segunda parte (gr)
3/8	0	0
1/4	1.71	3.48
4	29.52	37.31
8	432.15	356.29
10	61.3	41.15
16	175.21	97.56
20	83.9	47.45
30	80.36	41.51
40	80.05	42.53
60	100.82	56.1

100	81.82	42.08
200	81.27	39.26
PASANTE 200	72.71	49.67
SUBTOTAL	1280.82	854.39
	Total	2135.21
	Peso inicial	2135

- Con los datos recopilados, se desarrollaron las fórmulas correspondientes a Rosin-Rammler (ver tabla 10).

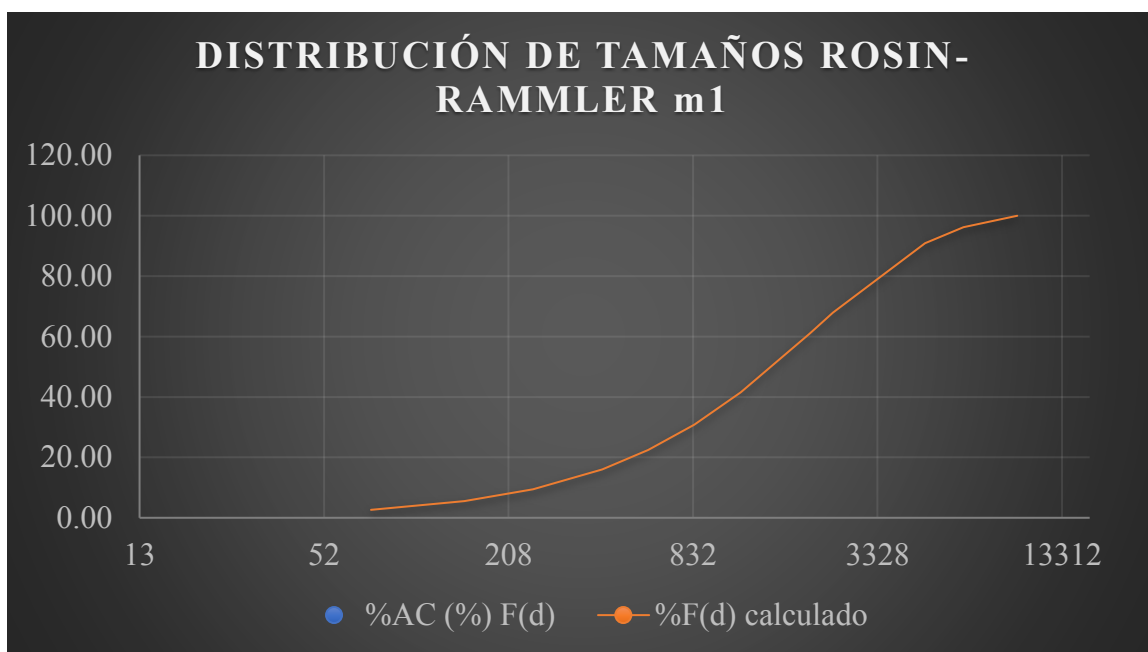


Figura 52. Granulometría Trituración P80 de Chinapinza Rosin-Rammler

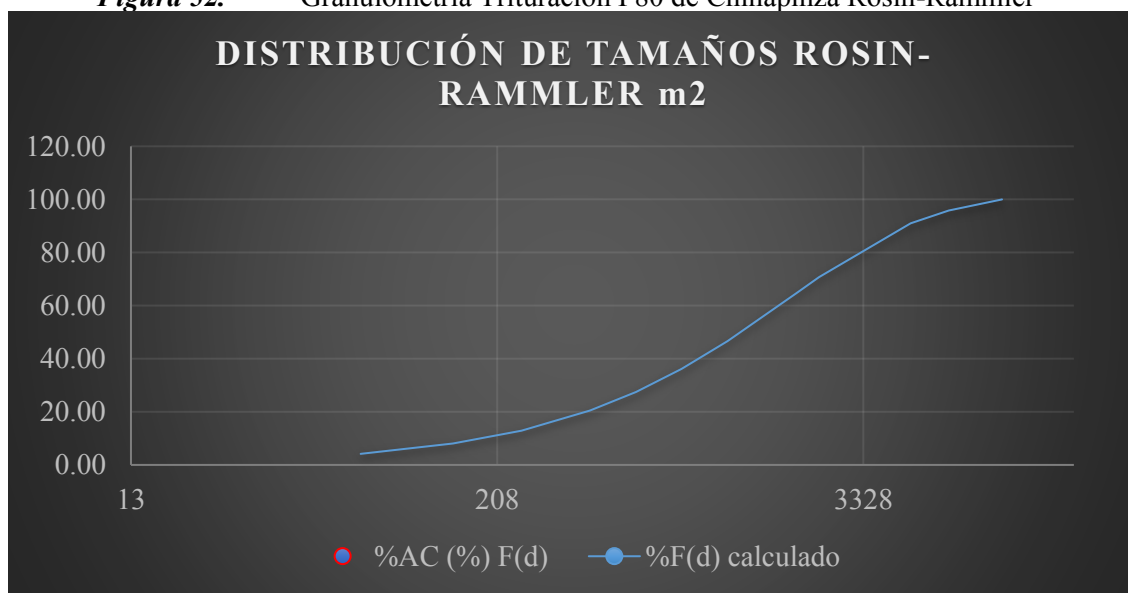


Figura 53. Granulometría Trituración P80 de Torata Rosin-Rammler

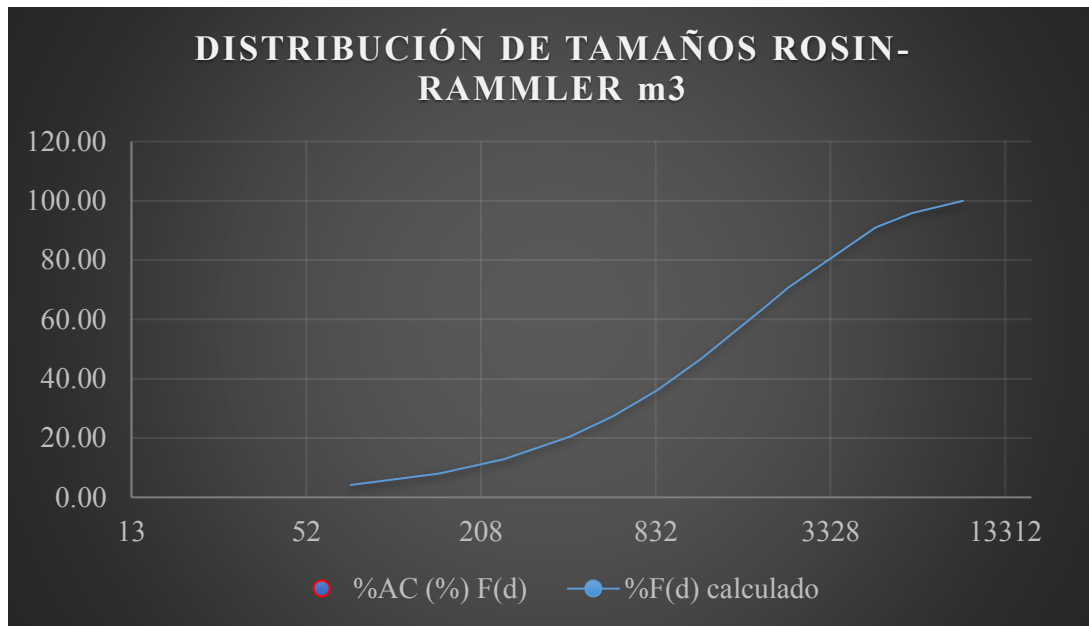


Figura 54. Granulometría Trituración P80 de Santa Isabel Rosin-Rammler

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 laboratorio. La realización del análisis se la 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.

6.3.4. Inspección y Preparación del molino.

Se comenzó por verificar la limpieza y el estado óptimo de funcionamiento del molino, asegurándose 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.

6.3.5. 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



Figura 55. *Materiales indispensables*

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 27. *Pesos iniciales previo a la molienda*

Chinapinza	6517.5 gr / 6.617 kg
Torata	6682 gr / 6.682 kg
Santa Isabel	4445 gr / 4.445 kg



Figura 56. *Gradiente del medio Moledor*

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 28. *Pesos de muestras*

Chinapinza	6517.5 gr / 6.617 kg	2 horas
Torata	6682 gr / 6.682 kg	1 hora 30 minutos
Santa Isabel	4445 gr / 4.445 kg	1 hora

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

1. Condiciones experimentales de las muestras mineralizadas

Se establecieron las condiciones 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.

Tabla 29. *Condiciones experimentales para ensayos de validación*

CONDICIONES EXPERIMENTALES	MUESTRA 1 CHINAPINZA	MUESTRA 2 TORATA	MUESTRA 3 SANTA ISABEL
GRADIENTE DE BOLAS	0.70 pulgadas, 1 pulgada, 1.5 pulgadas y 3.5 pulgadas	0.70 pulgadas, 1 pulgada, 1.5 pulgadas y 3.5 pulgadas	0.70 pulgadas, 1 pulgada, 1.5 pulgadas y 3.5 pulgadas
TIEMPO DE MOLIENDA	2 horas.	1 hora 30	1 hora
CARGA DEL MATERIAL A MOLER	6.617 kg	6.825 kg	4.445 kg
RELACIÓN AGUA/ MATERIAL	1:1 Agua: Material	1:1 Agua: Material	1:1 Agua: Material
DIMENSIÓN F80	Acondicionado a 3328 micras	Acondicionado a 3328 micras	Acondicionado a 3328 micras
NÚMERO DE TAMICES PARA ENSAYO	40, 60, 80, 100, 200, pasante 200	40, 60, 80, 100, 200, pasante 200	40, 60, 80, 100, 200, pasante 200

2. 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 29.
- 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 procede a distribuir la muestra de material molido sobre los tamices correspondientes (tabla 27), 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.



Figura 57. *Secado del material molido*

- Cálculo de la distribución granulométrica: Se calculó el porcentaje de material retenido en cada tamiz y se aplicó el método de Rosin-Rammler para calcular la distribución granulométrica.



Figura 58. *Pequeña fracción del material pasante malla 200*

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

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 (W_i) de 19 kWh/tonelada obtenida de literatura especializada.

Tabla 30. *Energía de Bond para Santa Isabel*

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

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 (W_i) de 12 kWh/tonelada obtenida de literatura especializada.

Tabla 31. *Energía de Bond para Torata*

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

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 (W_i) de 15 kWh/tonelada obtenida de literatura especializada.

Tabla 32. *Energía de Bond para Chinapinza*

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

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 buscando un porcentaje pasante de material a la malla 200 (molienda fina) mayor al 80%.

Según Hukki (ETSIMV, 1996), los tamaños de salida del producto en la etapa de molienda serían los siguientes:

Tipo de proceso	Tamaño de salida	Tipo de proceso	Tamaño de salida
Molienda gruesa	≈ 1 mm	Molienda gruesa	1-2 mm
Molienda fina	≈ 100 μm	Molienda media	200-500 μm
Molienda ultrafina	≈ 10 μm	Molienda fina	50-100 μm

Figura 59. Tipo de proceso en relación al tamaño de salida de partícula

Nota. Hukki (ETSIMV, 1996)

Tabla 33. Análisis Granulométrico de Santa Isabel 1 hora de molienda

Tamices	1	2	Suma Masa retenida	Retenido %	Ret acumulado %
40	0.1	0.1	0.2	0.02	0.02
60	1.35	1.25	2.6	0.30	0.33
80	29.42	23.39	52.81	6.13	6.46
100	25.44	29.34	54.78	6.36	12.82
200	141.45	107.75	249.2	28.95	41.77
PASANTE 200	296.65	204.7	501.35	58.23	100.00
Total		860.940			
Peso inicial		861.00			

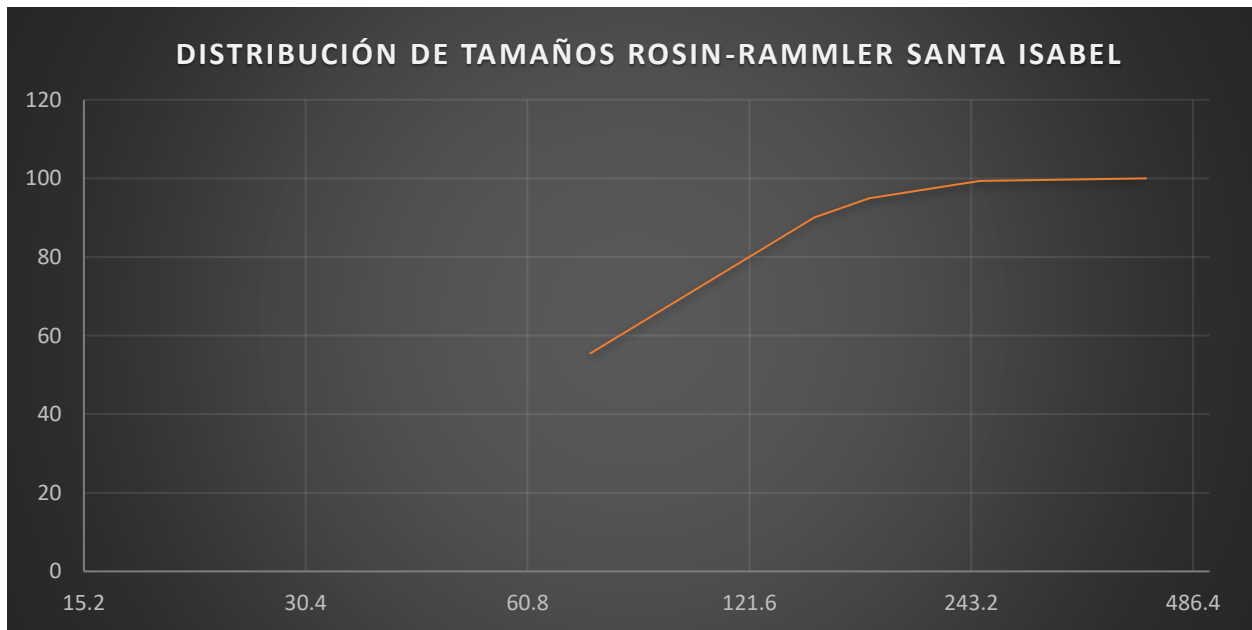


Figura 60. Distribución de tamaños P80 121.6 micras

Durante el análisis granulométrico de la muestra de Santa Isabel, con el fin de evaluar el desempeño del molino de bolas, 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.

Tabla 34. *Análisis Granulométrico de Torata 1 hora 30 minutos de molienda*

Tamices	1	2	Suma Masa retenida	Retenido %	Ret acumulado %
40	0.2	0.2	0.4	0.02	0.02
60	0.43	0.5	0.93	0.05	0.08
80	23.61	27.26	50.87	3.00	3.08
100	22.35	29.38	51.73	3.06	6.14
200	180.25	199.53	379.78	22.43	28.57
PASANTE 200	587.05	622.22	1209.27	71.43	100.00
	Total	1692.98			
	Peso inicial	1693.00			

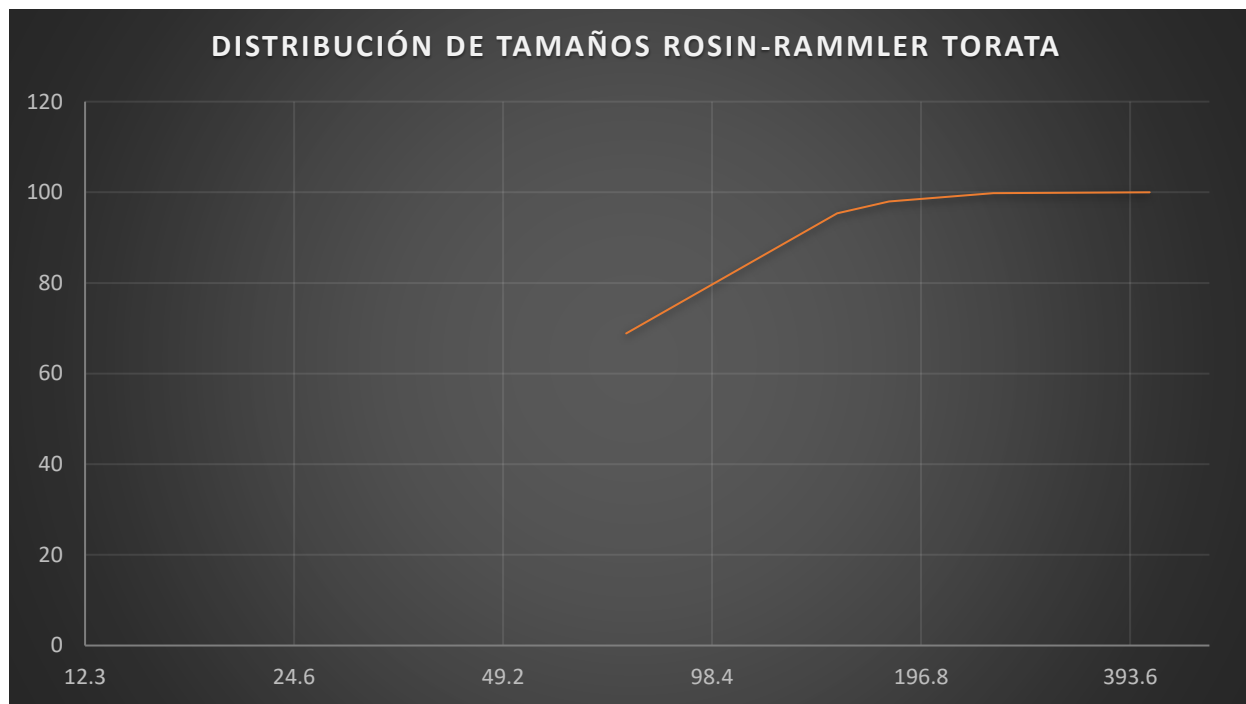


Figura 61. *Distribución de tamaños P80 98.4 micras*

Durante el análisis granulométrico de la muestra de Torata, con el fin de evaluar el desempeño del molino de bolas, 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.

Tabla 35. *Análisis Granulométrico de Chinapinza 2 horas de molienda*

Tamices	1	2	Suma Masa retenida	Retenido %	Ret acumulado %
40	0	0	0	0.00	0.00
60	1.25	0.25	1.5	0.13	0.13
80	11.08	9.02	20.1	1.75	1.88
100	26.02	22.2	48.22	4.19	6.07
200	73.6	52.15	125.75	10.93	16.99
PASANTE 200	521.65	433.63	955.28	83.01	100.00
	Total	1150.85	1150.85		
	Peso inicial	1158.62	920.68		

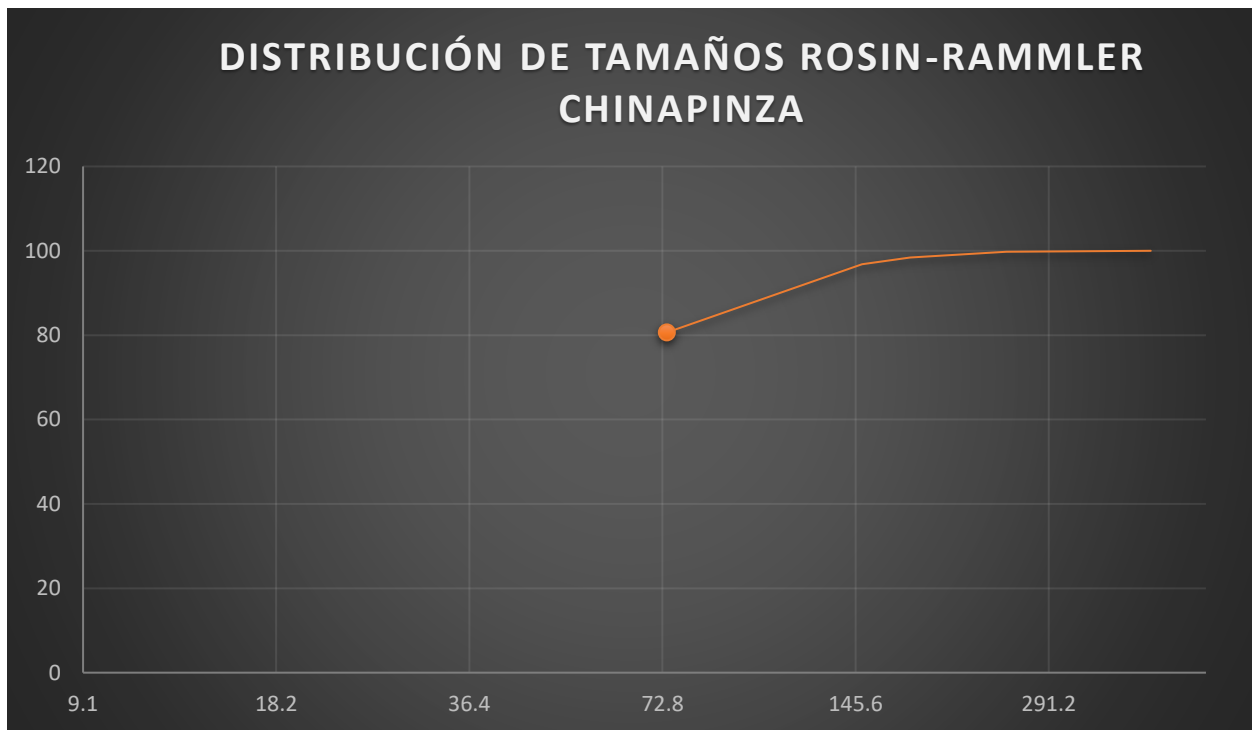


Figura 62. *Distribución de tamaños P80 72.8 micras*

Durante el análisis granulométrico de la muestra de Chinapinza, con el fin de evaluar el desempeño del molino de bolas, 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.

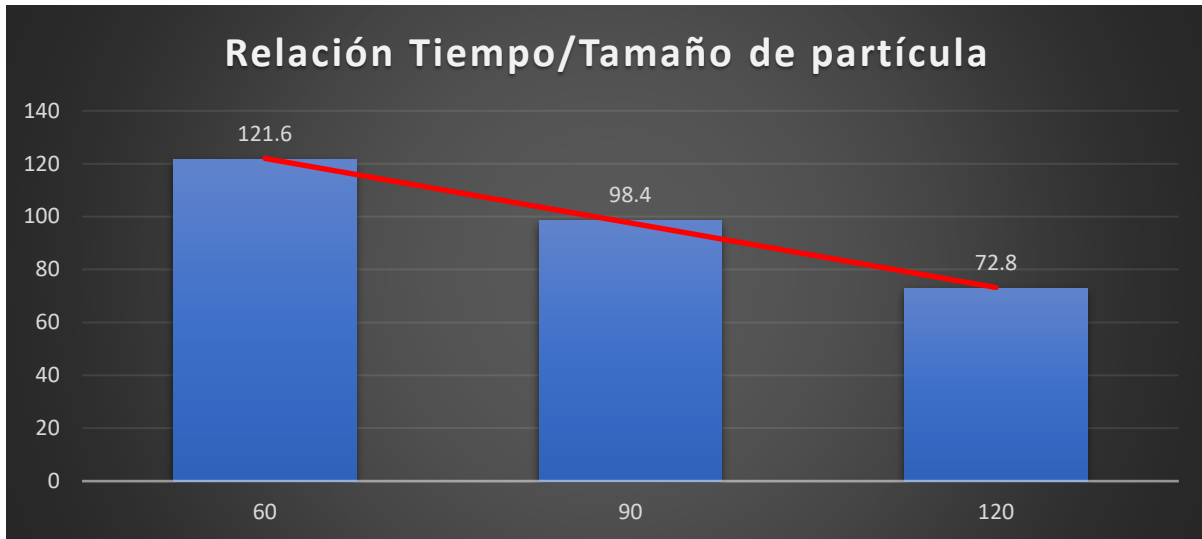


Figura 63. Distribución Granulométrica en relación al tiempo de molienda



Figura 64. Gráfico de curva en relación al tiempo y la granulometría

En ambas figuras 63 y 64, se hacen referencia a 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. Se puede observar que mientras el tiempo aumenta el tamaño de partícula disminuye lo que significa que la granulometría aumenta. Estos hallazgos

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.

3. 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.

Pantalla	LCD retroiluminada de 2000 cuentas, gráfica de barras análoga
Tasa de actualización de pantalla	Dígitos primarios LCD: 0.5 segundos; Gráfica de barras: 50 mS
Gráfica de barras análoga	En incrementos de 1dB con amplitud de 50dB
Micrófono	Condensador Electret (0.5" diámetro)
Amplitud de banda de medición	31.5 Hz a 8 kHz
Escala de medición	Ponderación A: 30 a 130 dB; Ponderación C: 35 a 130 dB 6 escalas en incrementos de 10 dB: 30 a 80dB, 40 a 90dB, 50 a 100dB, 60 a 110dB, 70 a 120dB, 80 a 130dB
Precisión / Resolución	± 1.5dB / 0.1dB
Selección del tiempo de respuesta	Rápido (125 ms) y Lento (1 segundo)
Salidas análogas CA y CD	0.707 VCA rms en toda la escala; 10m VDC / dB; Enchufes de salida de 3.5 mm
Normas	Cumple con ANSI y IEC Tipo 2
Calibrador externo	Modelos Extech 407766 o 407744
Tensión	Batería de 9V; Vida de la batería 20 horas (típica) con indicación de batería débil
Dimensiones / peso	80 x 256 x 38 mm (3.2 x 10.1 x 1.5") / 240 g (8.5 oz.)

Figura 65. Especificaciones Sonómetro EXTECH 407750
Nota. (Extech instruments, 2013)



Figura 66. Descripción partes del sonómetro
Nota. (Extech instruments, 2013)

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.

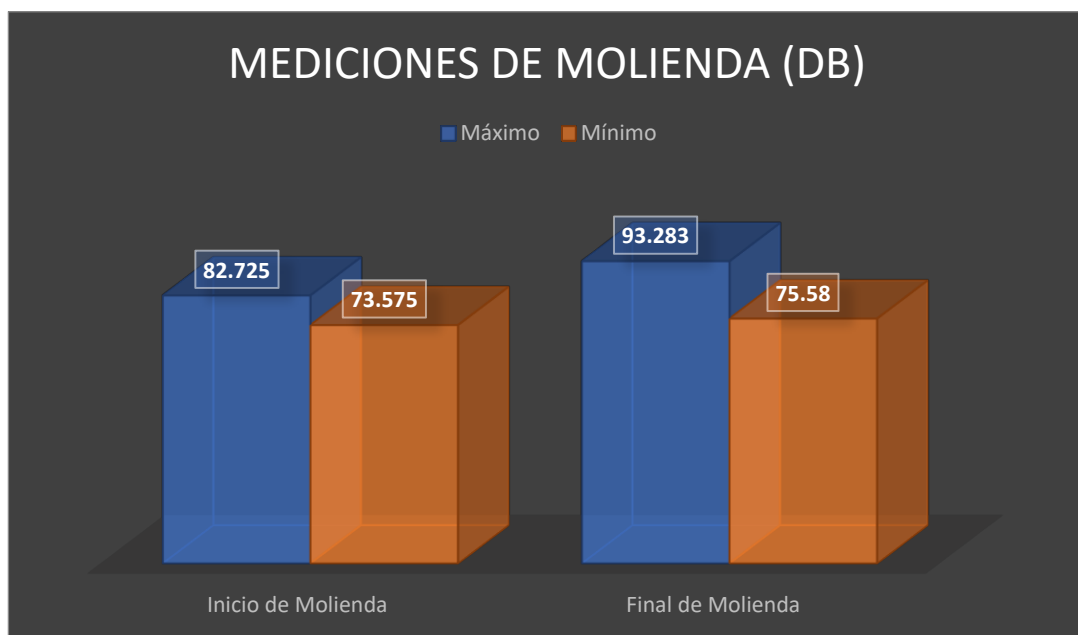


Figura 67. Gráfica de máximos y mínimos por medio del sonómetro

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.

La NOM-011-STPS-2001 regula la exposición laboral al ruido en México. Según esta norma, los operadores tienen la siguiente responsabilidad:

- Todos los trabajadores expuestos a niveles de ruido igual o superiores a 85 dB(A) deben contar con equipo de protección personal auditiva, de acuerdo con lo establecido en la NOM-017-STPS-1993.



Figura 68. EPP Auditiva para molienda

7. 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 profundo análisis 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 justifica en función de la necesidad de realizar ensayos y pruebas iniciales que sean representativos y significativos para el proceso de molienda. Esta capacidad garantiza la manipulación de cantidades adecuadas de material, crucial para obtener resultados precisos y reproducibles en la investigación y desarrollo de nuevos procesos industriales.

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 fue objeto de un 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, y en base a las recomendaciones del Licenciado en Mecánica Beymar Jiménez y el Arquitecto Galo Cajas, se determinó que un grosor óptimo de 12 mm, es adecuado tanto desde una perspectiva económica como estructural. Un tambor con un grosor menor podría resultar en una menor durabilidad y mayor susceptibilidad a fallos estructurales ya que no se cuenta con revestimiento interno, mientras que un grosor mayor podría aumentar innecesariamente el peso, afectando negativamente la eficiencia energética y elevando los costos de producción y operación. 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.

Autores como Roberts (2011) y Zhang et al. (2014) han demostrado que un grosor intermedio, como el de 12 mm, permite un balance ideal entre resistencia estructural y eficiencia

operativa. Roberts (2011) señala que espesores menores a 10 mm suelen comprometer la durabilidad del tambor, mientras que Zhang et al. (2014) encontraron que grosores superiores a 14 mm incrementan los costos sin mejoras significativas en la resistencia.

Para optimizar el rendimiento del molino, se siguió la recomendación de Wills y Napier-Munn (2006), quienes afirman: "El molino deberá trabajar entre un 50 % y un 90 % de su velocidad crítica, dependiendo de factores económicos. No obstante, se suelen utilizar velocidades de rotación de 65-75 % para los molinos de bolas". En función de esto, 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, resultando en una relación 1:1, es decir, por cada kg de material se añade 1 L de agua. Esta configuración se sustenta en estudios adicionales de diversos autores. Por ejemplo, Rajamani y Herbst (1991) demostraron que operar molinos de bolas dentro del rango de 70-75% de la velocidad crítica maximiza la eficiencia de molienda y minimiza el desgaste del equipo.

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.

Al comparar los resultados obtenidos con respecto al molino de bolas Batch de laboratorio de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), se destacan varias diferencias significativas. En primer lugar, la capacidad mínima del molino diseñado, que es de al menos 3 kg, supera considerablemente al de la UTPL, 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.

. Esta capacidad ampliada permite realizar una variedad más extensa de ensayos complementarios y posiciona al molino en la categoría de tamaño medio a grande, adecuada para

procesar cantidades significativas de material. Es importante notar que, debido a su mayor carga, el tiempo de molienda puede ser ligeramente prolongado en comparación con el molino de bolas Batch. En segundo lugar, el diseño del molino de bolas Batch presenta deficiencias operativas, como el uso de tres rodillos para el giro del tambor, pero con solo dos en operación, y problemas de recalentamiento del motor después de un cierto período de trabajo. En contraste, el motor del molino diseñado fue elegido por la capacidad de operar continuamente durante jornadas completas de trabajo sin experimentar sobrecalentamiento ni esfuerzos innecesarios gracias a la transmisión, lo cual mejora significativamente su fiabilidad operativa. Lo más destacable es que el molino de bolas cuenta con un diseño único.

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.

8. Conclusiones

Del estudio del diseño de un molino de bolas con la finalidad de realizar pruebas de molienda del material mineralizado proveniente de la región Sur del Ecuador se pudo obtener las siguientes 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.

9. Recomendaciones

- Considerando la eficiencia de molienda alcanzada en 1 hora 30 minutos, se recomienda realizar pruebas adicionales variando la velocidad de rotación del molino de bolas. Esto permitirá determinar si existe una velocidad óptima que maximice la eficiencia de molienda sin comprometer la integridad del equipo ni la calidad del producto final. Además, para obtener una comprensión más completa del rendimiento del molino de bolas y de los factores que influyen en su funcionamiento, se recomienda mantener un registro detallado de los datos de operación durante las pruebas de molienda.
- Dado que el molino de bolas estará sometido a condiciones de trabajo exigentes en el laboratorio durante pruebas continuas de molienda, se sugiere realizar un seguimiento detallado del desgaste de las paredes de la cámara de molienda y las bolas. Este análisis permitirá detectar posibles áreas de desgaste excesivo o deterioro, lo que podría afectar la eficiencia y la calidad de la molienda. La identificación temprana de estos problemas facilitará la implementación oportuna de medidas correctivas para prolongar la vida útil del equipo y mantener la calidad del producto final.
- Para mejorar la eficiencia y la uniformidad en el proceso de molienda, se sugiere considerar la implementación de un gradiente de tamaño de bolas en el molino. Se recomienda añadir una combinación de bolas de 2 pulgadas y 2.5 pulgadas de diámetro a las que ya estaban establecidas, lo que ayudará a optimizar la molienda de diferentes tamaños de partículas y a reducir la formación de aglomerados. Esta estrategia permitirá una distribución más eficiente de la energía de molienda y una mayor capacidad de adaptación a las variaciones en la alimentación del molino, mejorando así la calidad del producto final y la eficacia del proceso de molienda en el laboratorio.
- Se recomienda realizar ensayo de compresión a las muestras para molienda, ya que en este proceso de molienda el ensayo proporcionará datos esenciales sobre la capacidad del material para fracturarse, lo que permitiría optimizar los parámetros de molienda, ajustar las condiciones operativas para mejorar la eficiencia del proceso, reducir el consumo de energía y minimizar el desgaste de los equipos. El ensayo de compresión influye directamente en la molienda al permitir la optimización precisa de parámetros como la velocidad del molino y el tiempo de procesamiento, lo que asegura una molienda eficiente y uniforme. Además, la información obtenida reduce costos operativos al disminuir el

tiempo de operación y el desgaste de los equipos, mejorando así la calidad del producto final al garantizar que las partículas resultantes tengan las características deseadas.

- Con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados y la validez de las pruebas de molienda, se aconseja establecer procedimientos de control de calidad rigurosos y llevar a cabo la calibración regular de los equipos de laboratorio. Esto incluye la verificación de la precisión de los instrumentos de medición, así como la estandarización de los métodos de ensayo para minimizar la variabilidad experimental y asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos.

10. Bibliografía

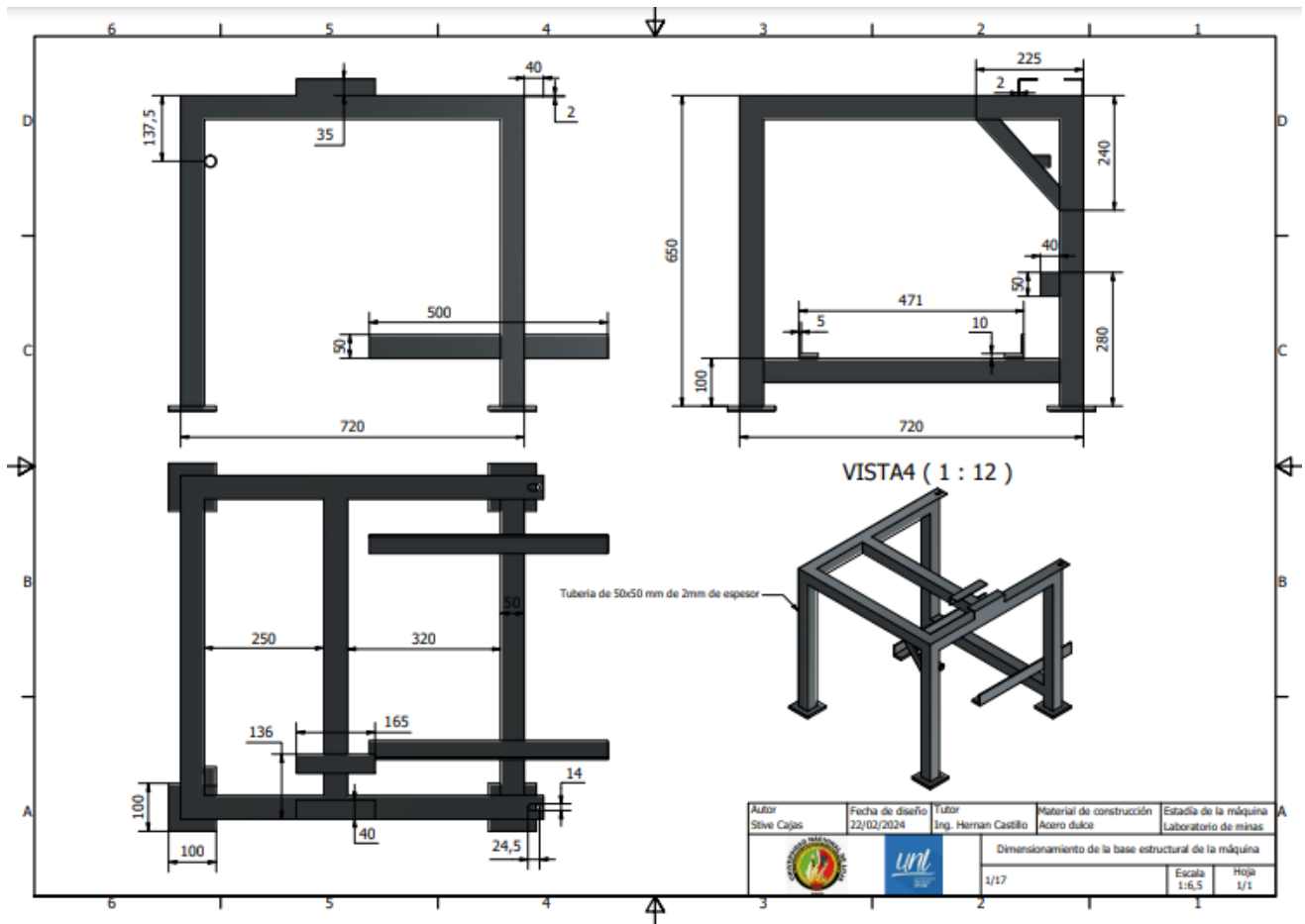
- Alcántara Vallares, J. R. (2008). Diseño práctico de un molino de bolas. [*Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica*]. Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de. Obtenido de Repositorio studocu <https://n9.cl/hxnro>
- Amores Balseca, E., & Maldonado Bernabé, C. (2019). Diseño y construcción de 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>
- C. Mora, M. (29 de Julio de 2022). Obtenido de http://www.mecapedia.uji.es/pages/correa_trapezoidal.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>
- David. (28 de Junio de 2016). *Molienda*. Obtenido de 911 Metallurgist: <https://n9.cl/iuscz>
- 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>
- Extech instruments. (2013). *Extech instruments*. Obtenido de Manual de Usuario: https://www.finaltest.com.mx/v/vspfiles/assets/datasheet/407750_UMsp.pdf
- 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/90fl2>
- 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>
- Ortíz 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>
- 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

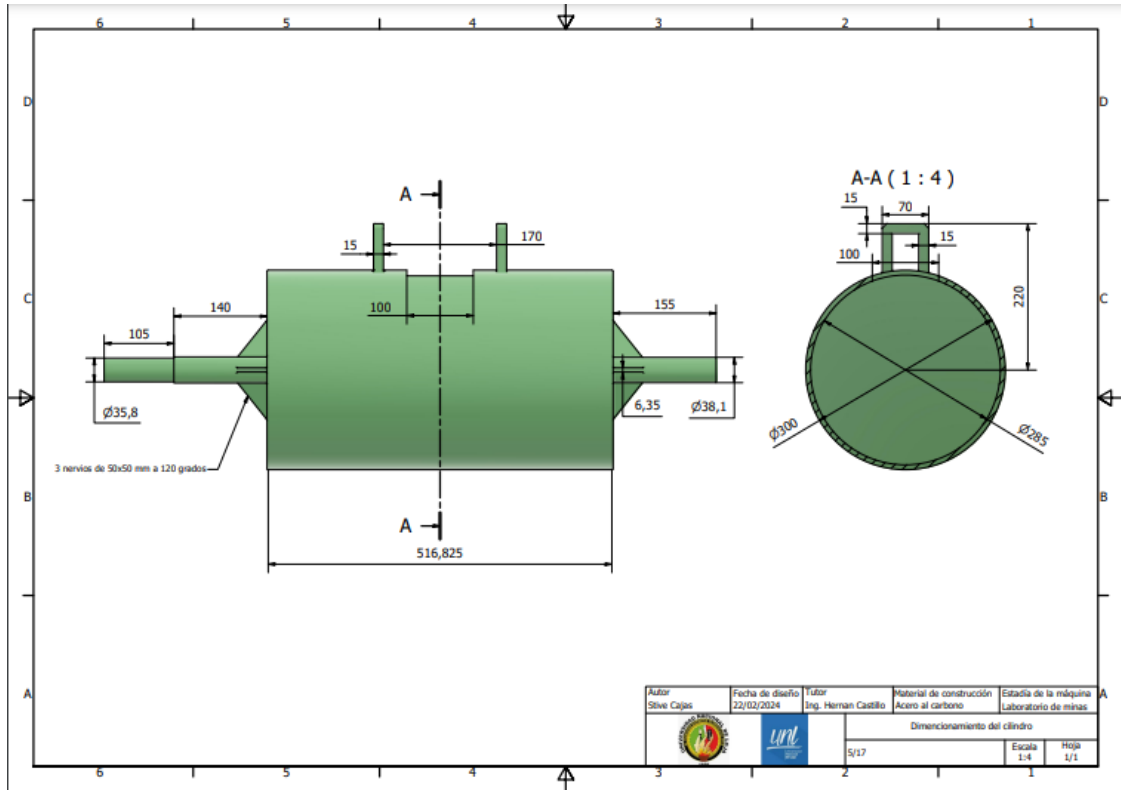
- Ureña. [*Trabajo de grado, Ingeniería Química*]. Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña. . Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña. URL: <https://n9.cl/xjafq>
- Rojas, J. (2018). Evaluación de índice de trabajo, (Work Index); en un yacimiento tipo pórfido de cobre y su implicancia geometalúrgica. [*Trabajo de grado, Ingeniería Geológica*]. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Obtenido de <https://n9.cl/uwho4>
- Salazar, K. (2014). Maximización de la información de conminución obtenible desde muestras de exploración. [*Trabajo de grado, Ingeniería Civil de Minas*] . Universidad de Chile, Santiago de Chile. Obtenido de Repositorio de Universidad de Chile: <https://n9.cl/zfvvgx>
- Zumaran, D. (2017). Evaluación de la influencia de las variables en la distribución granulométrica del producto de molienda por bolas de minerales mediante diseños experimentales. [*Trabajo de grado, Ingeniería Metalúrgica*]. Universidad Nacional de San Agustín, San Agustín. Obtenido de <https://n9.cl/9i5rb>

11. Anexos

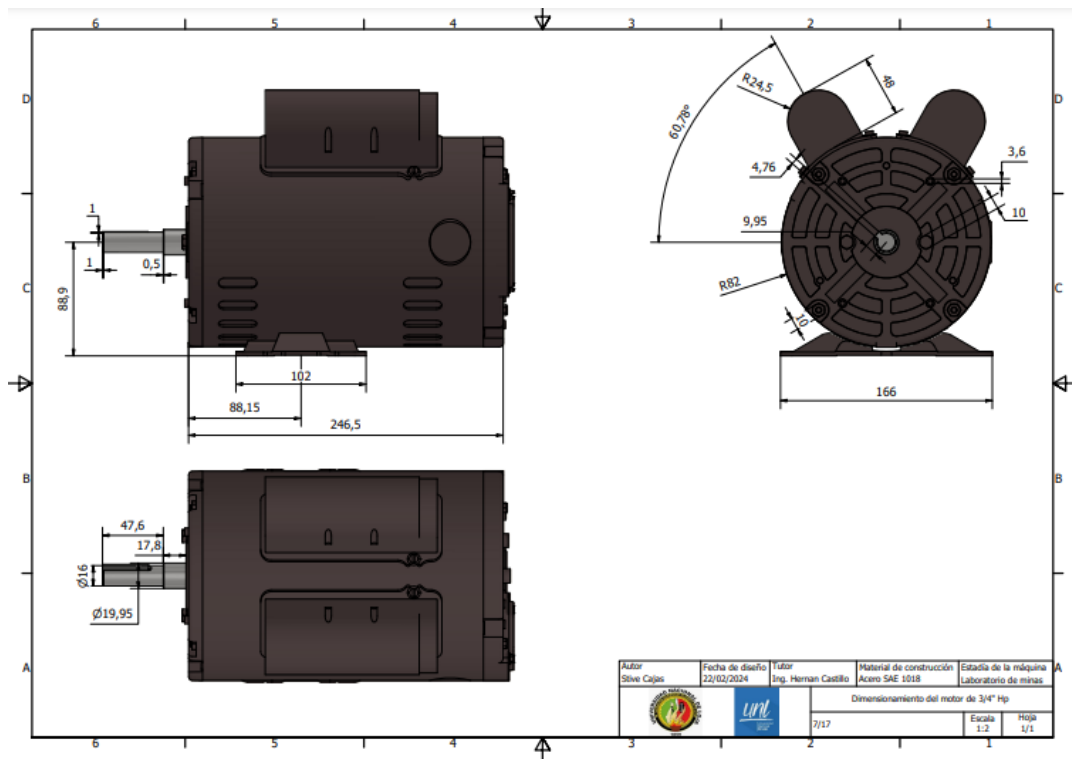
Anexo 1. Diseño de la estructura de la mesa para el soporte del cilindro



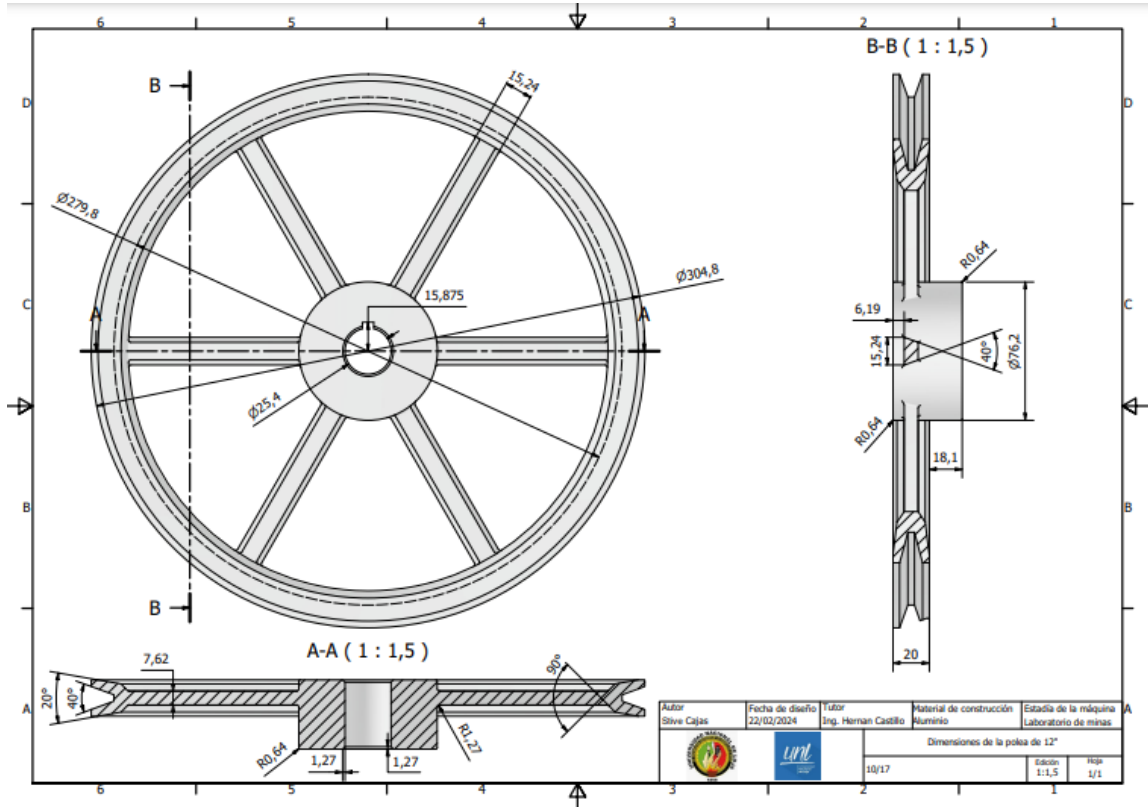
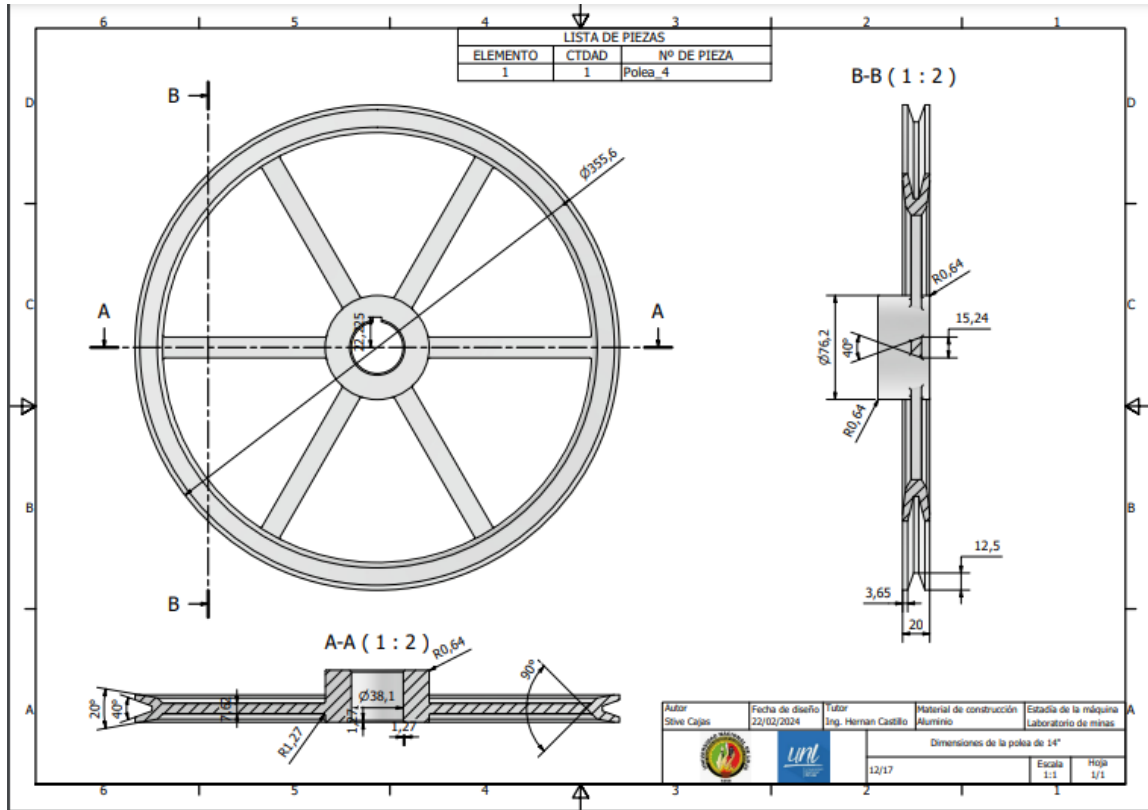
Anexo 2. Diseño de la cámara de molienda



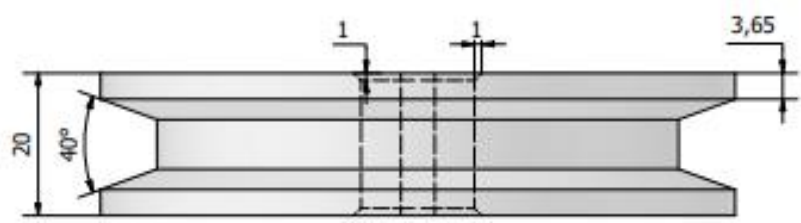
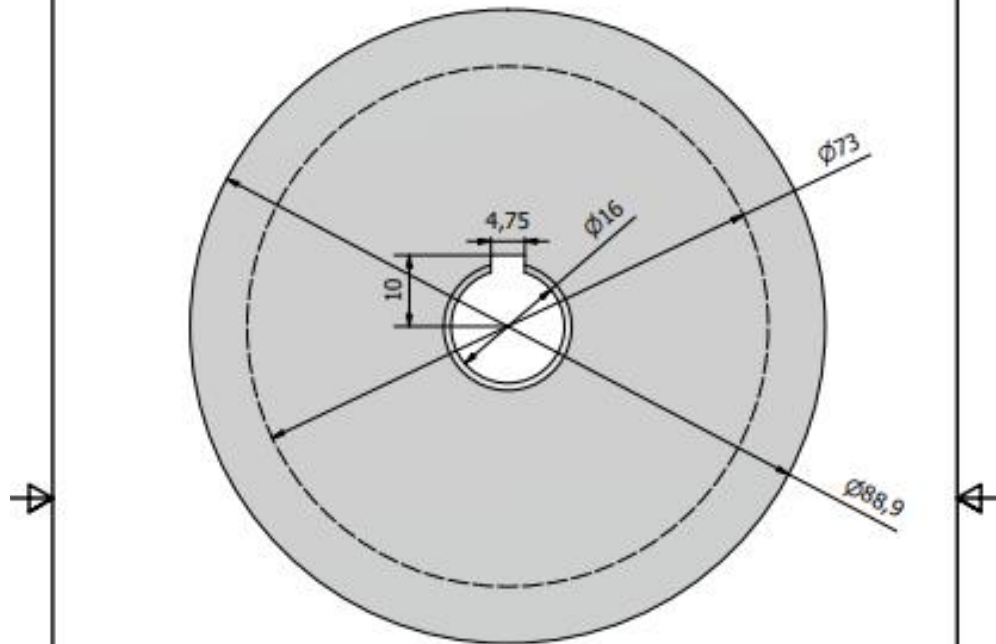
Anexo 3. Diseño del motor que se empleó





Anexo 4. Diseño de poleas con sus diferentes diámetros

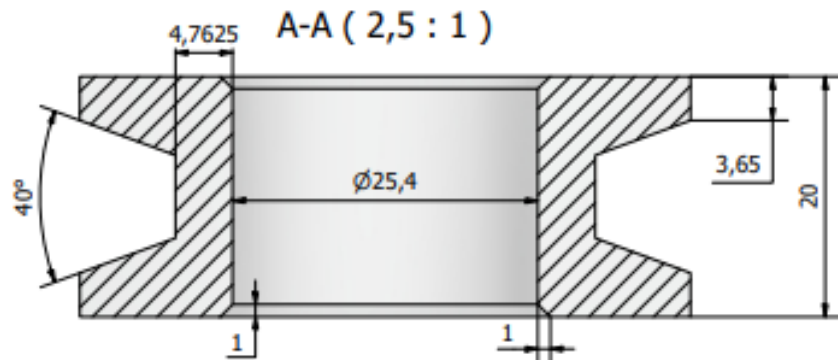
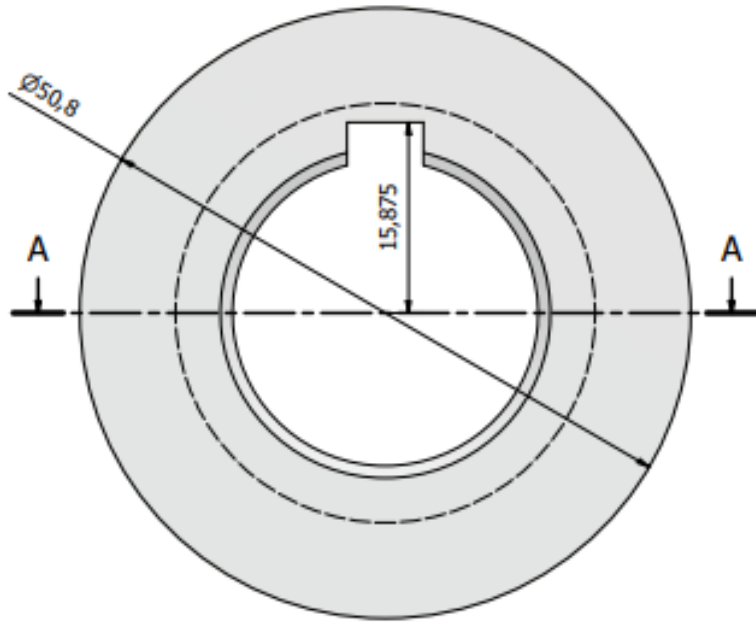




LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Polea_1.1



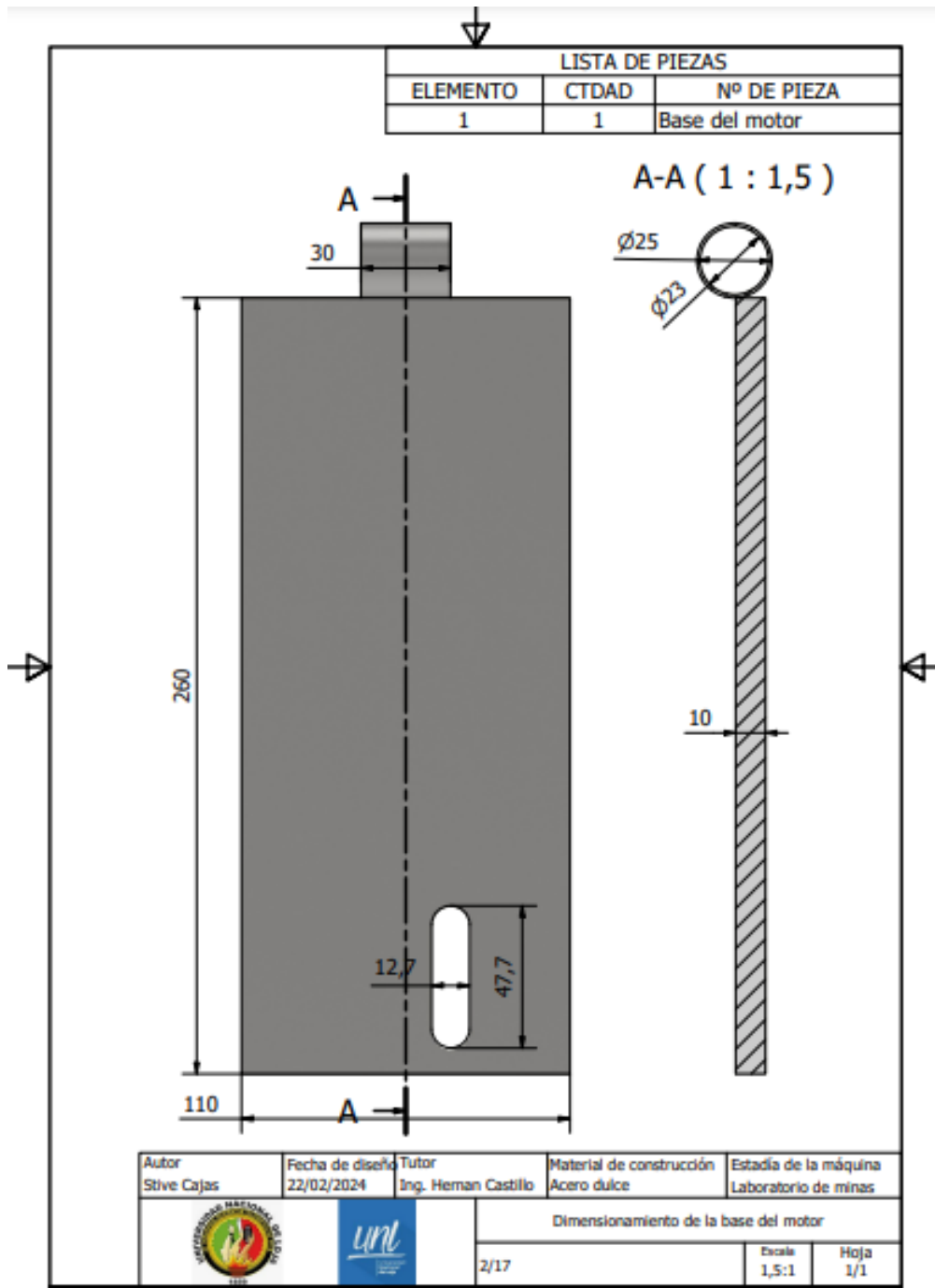
Autor Stive Cajas	Fecha de diseño 22/02/2024	Tutor Ing. Hernan Castillo	Material de construcción Aluminio	Estadía de la máquina Laboratorio de minas
 				Dimensiones de la Polea de 3 1/2"
9/17			Escala 1,5:1	Hoja 1/1

LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Polea_3

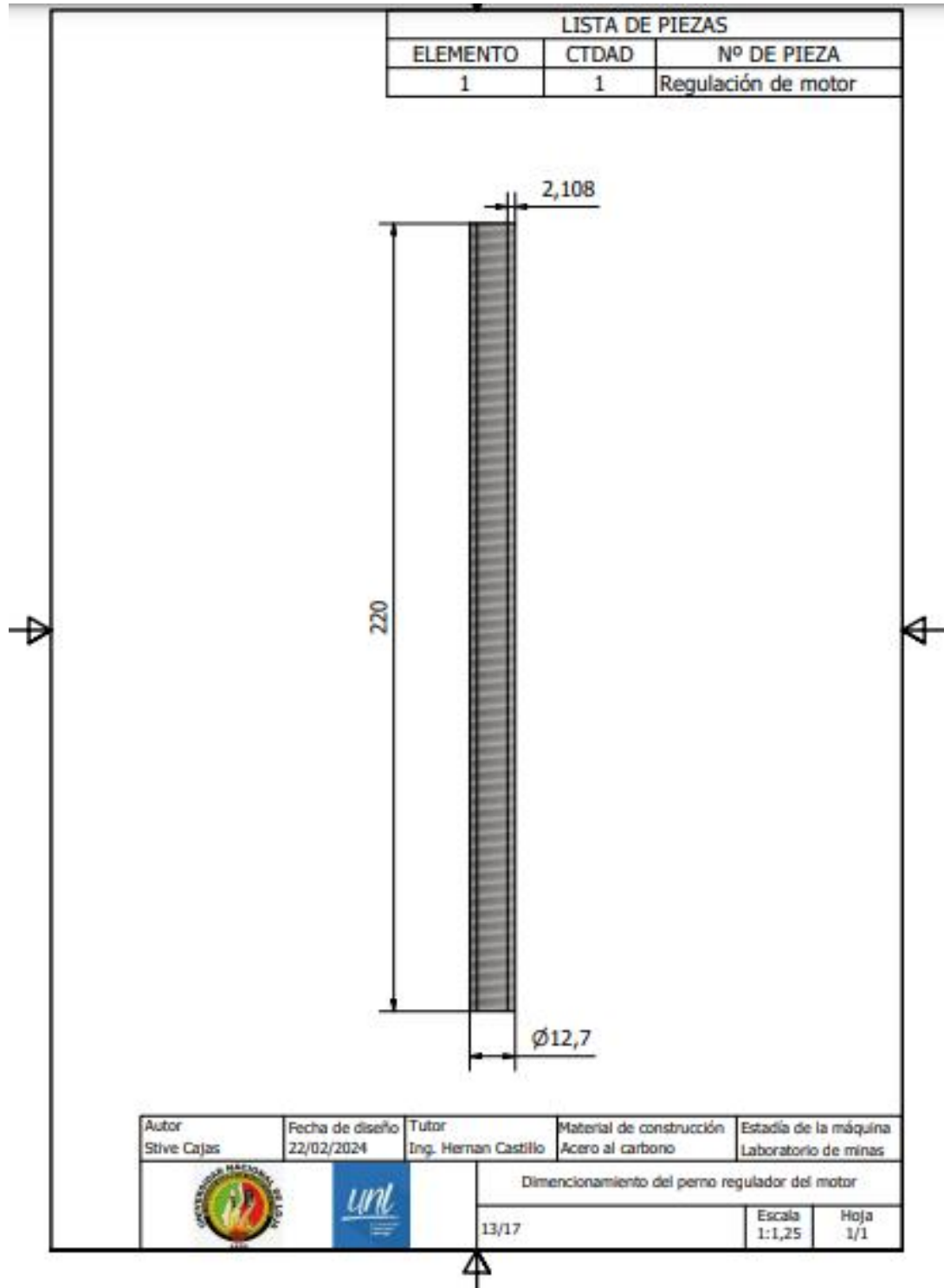


Autor Stive Cajas	Fecha de diseño 22/02/2024	Tutor Ing. Hernan Castillo	Material de construcción Aluminio	Estadía de la máquina Laboratorio de minas
 		Dimensiones de la polea de 2"		
11/17		Escala 2,5:1	Hoja 1 / 1	

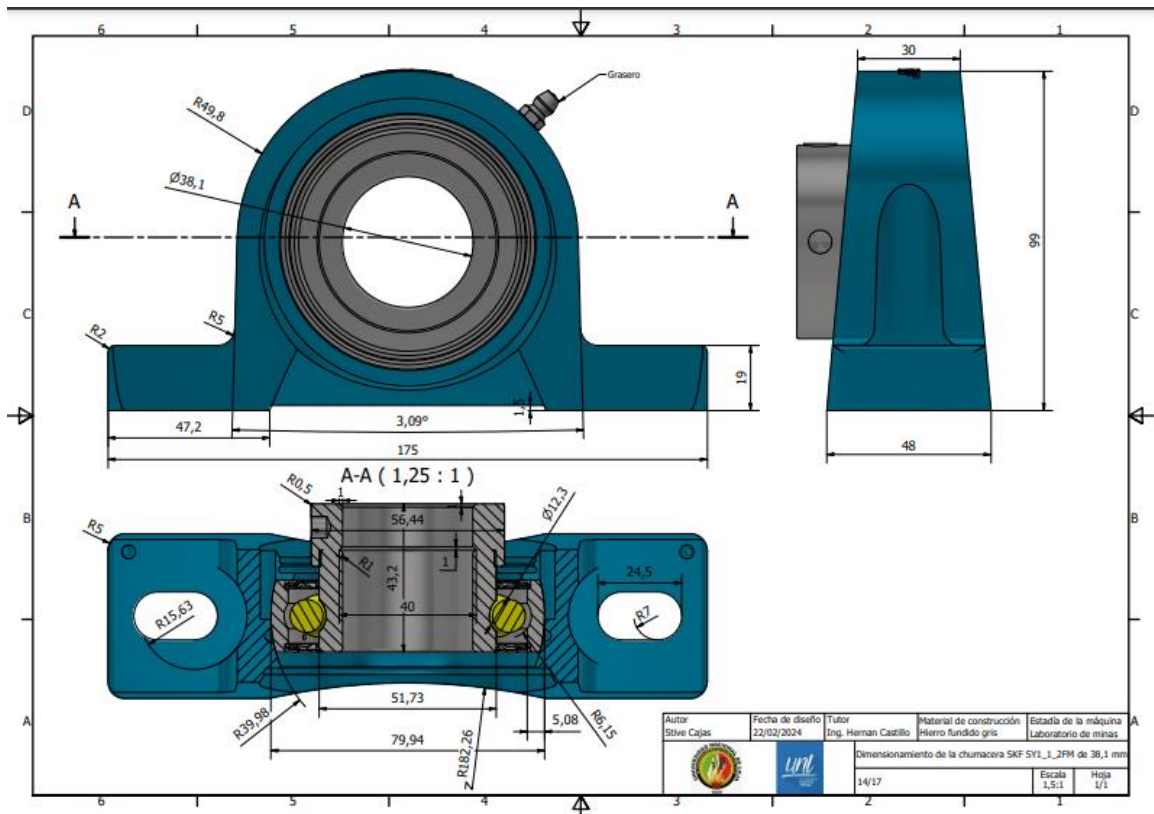
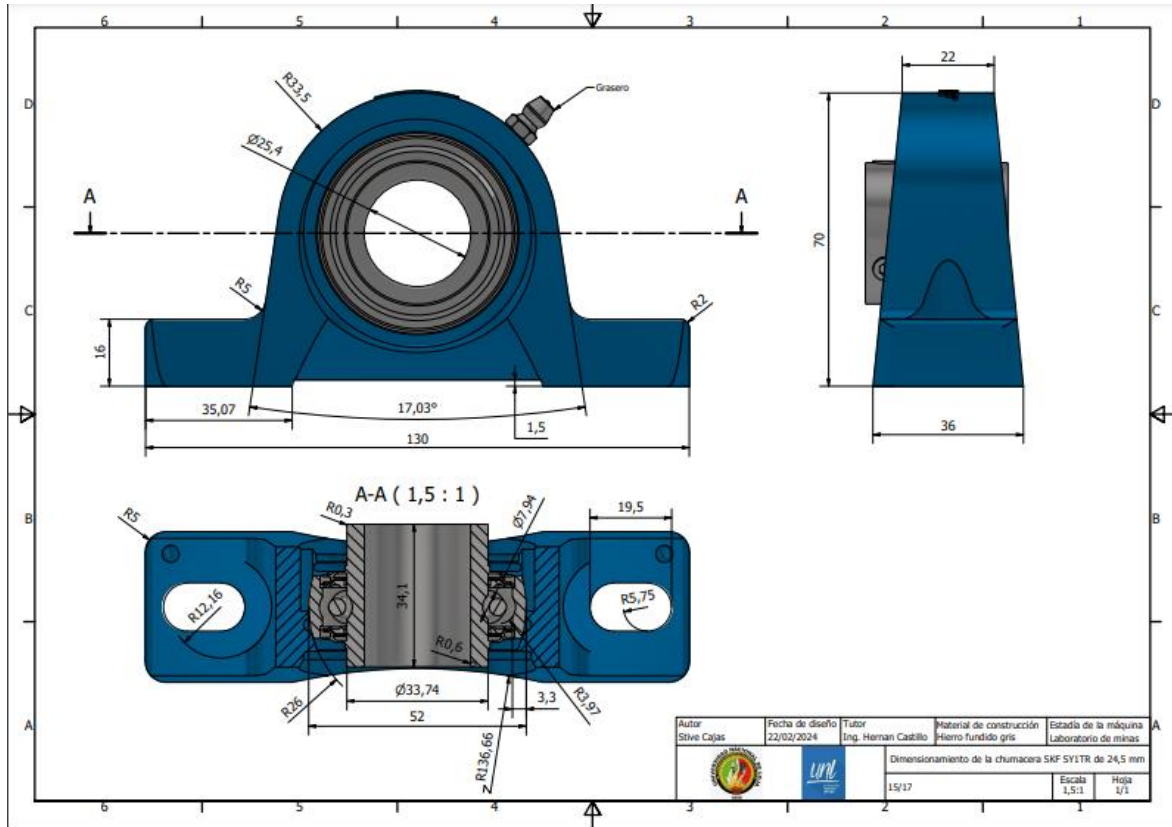
Anexo 5. Diseño base del motor



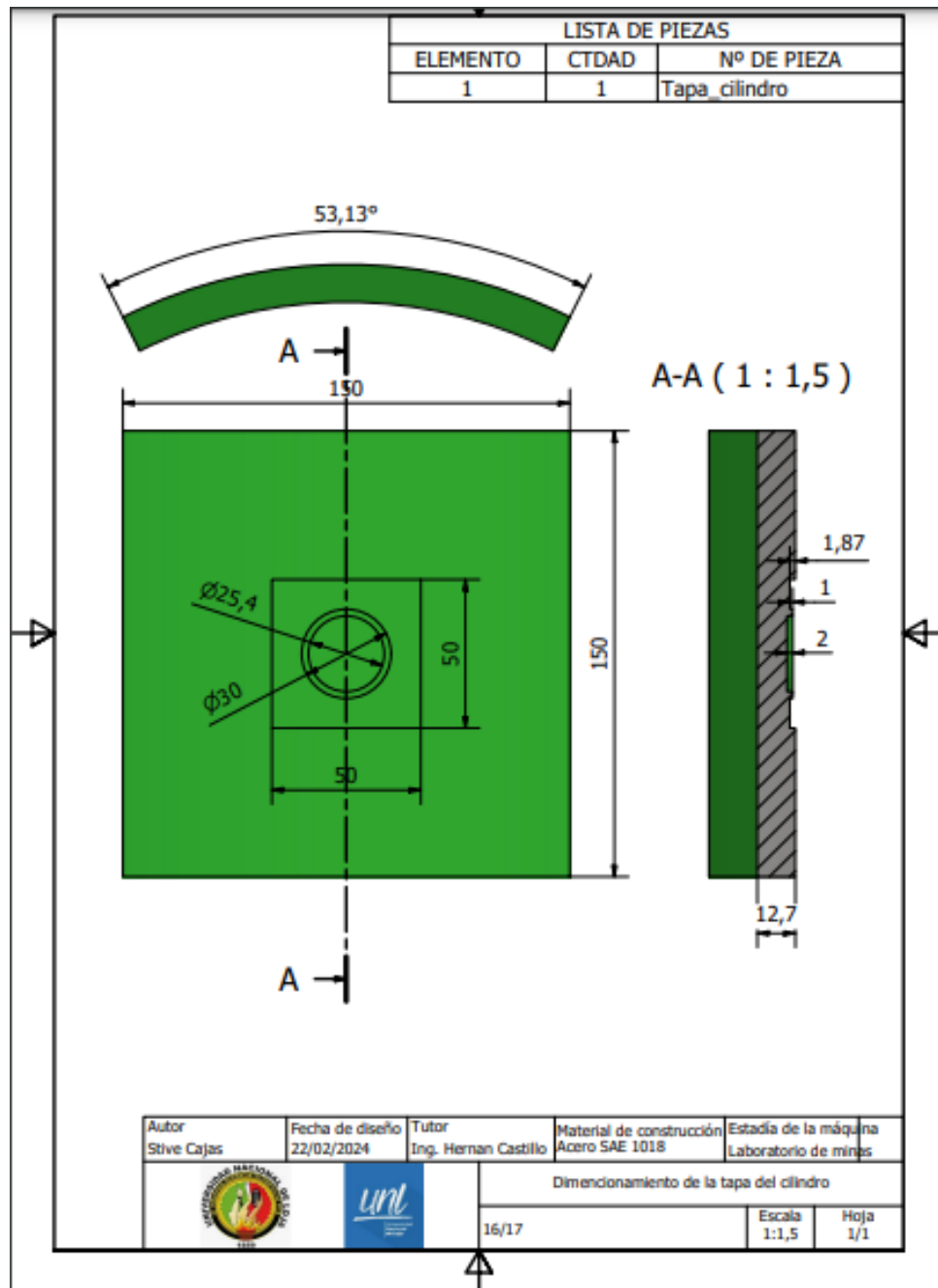
Anexo 6. Perno templador

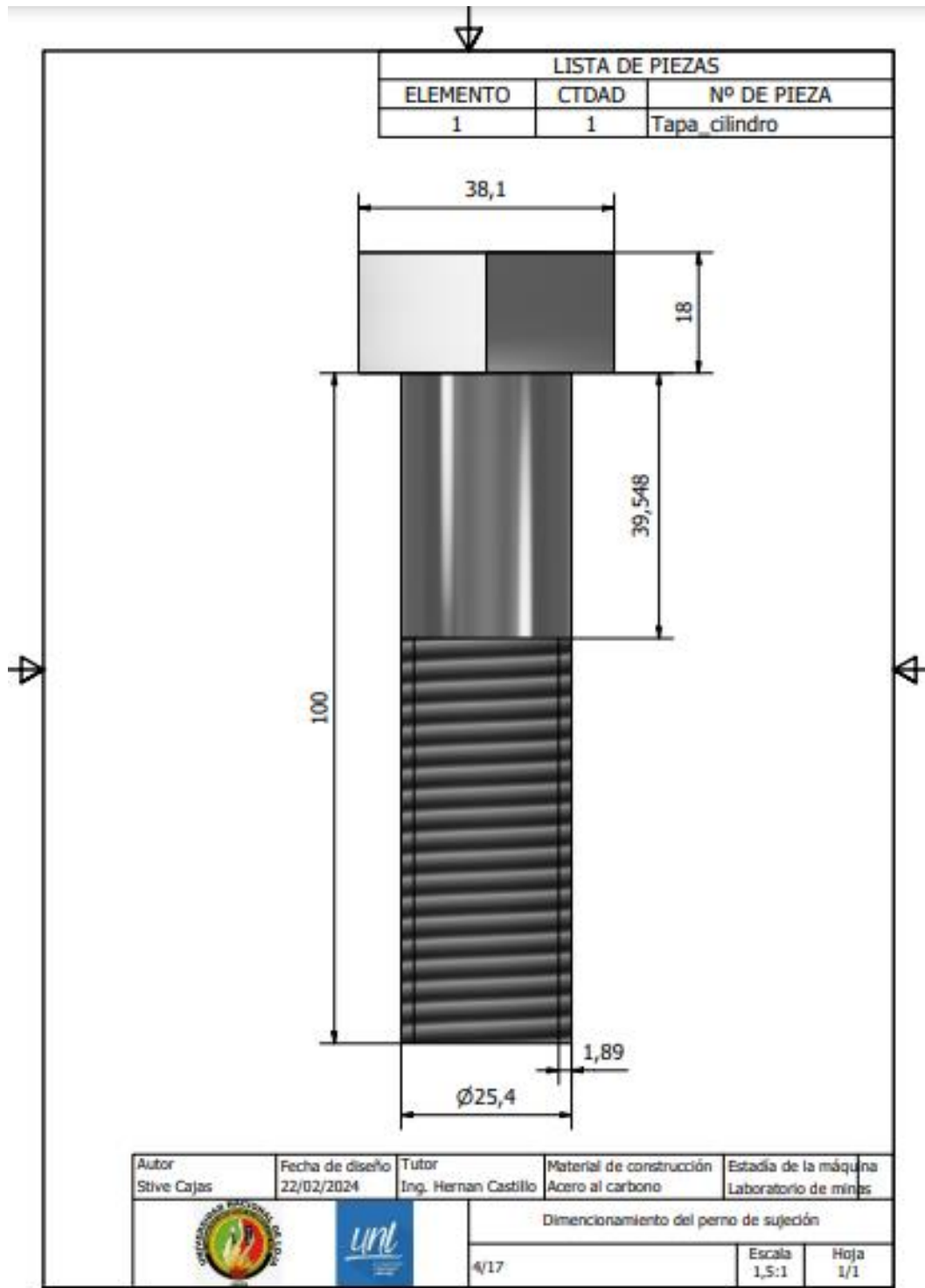


Anexo 7. Chumaceras

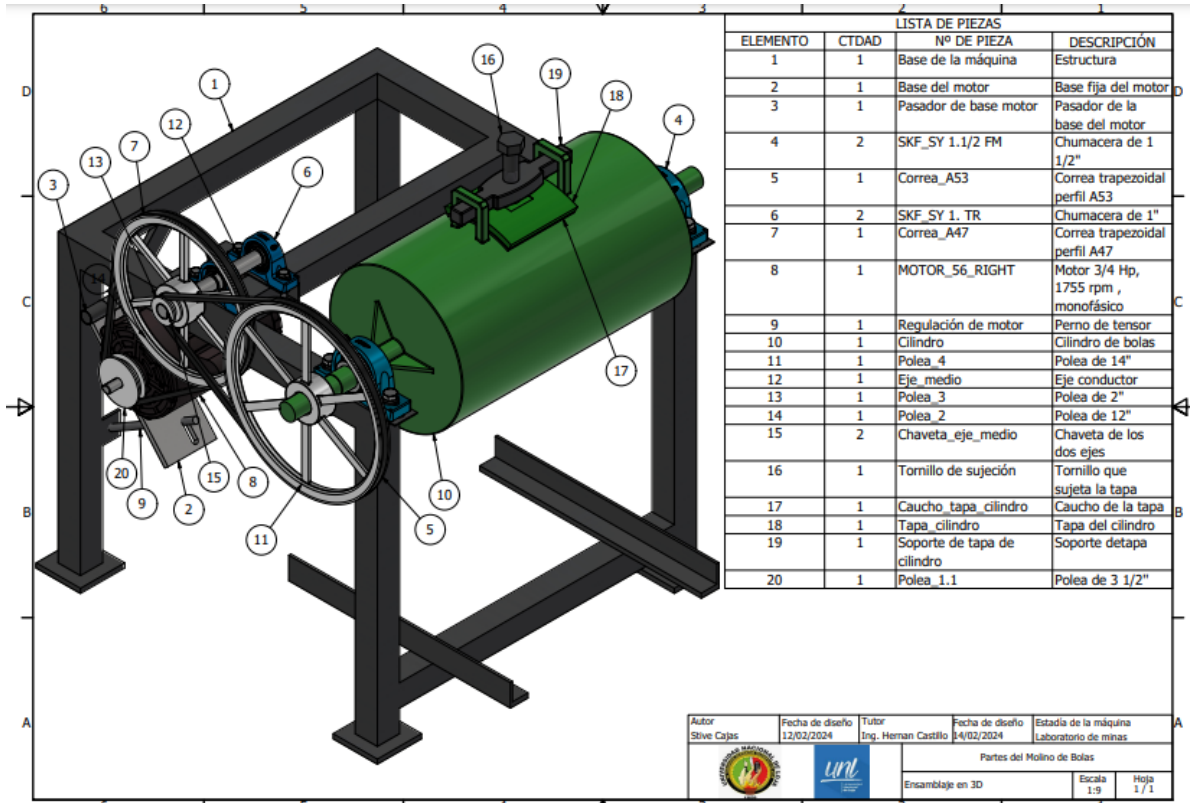


Anexo 8. Sistema de sellado del molino

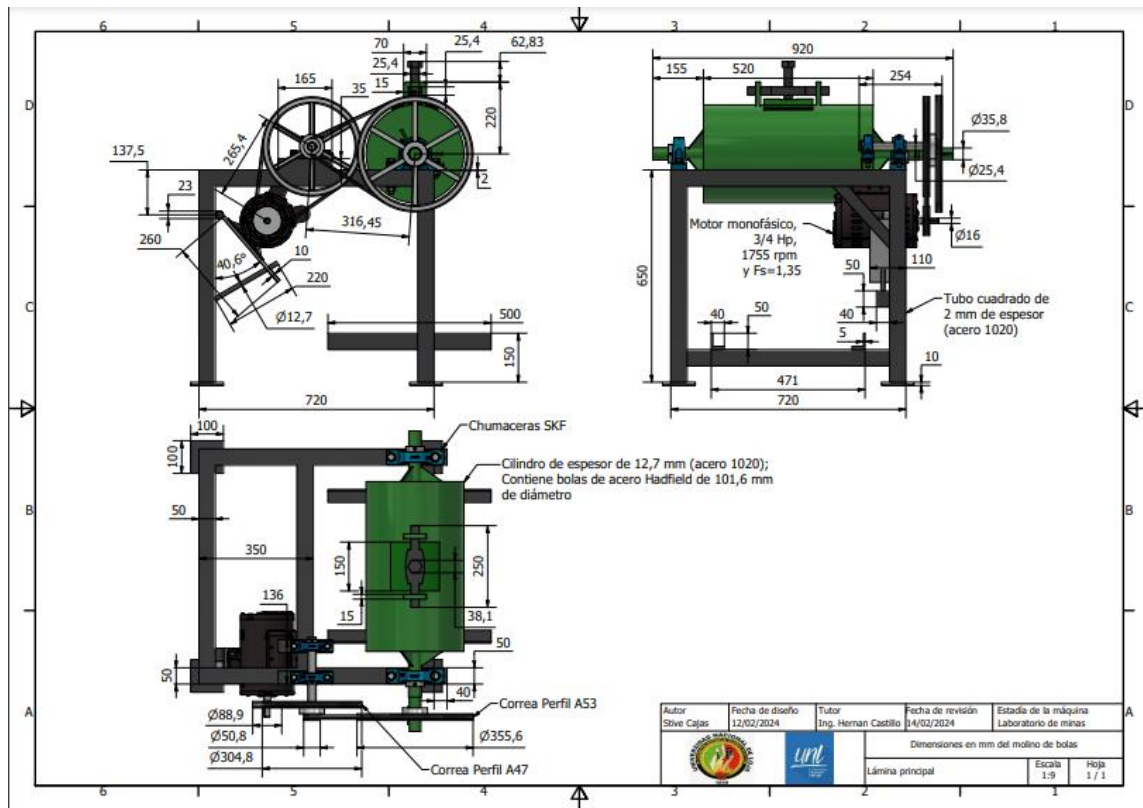




Anexo 9. Diseño final del molino



Autor Steve Cajas	Fecha de diseño 12/02/2024	Tutor Ing. Hernan Castillo	Fecha de diseño 14/02/2024	Estado de la máquina Laboratorio de minas
Partes del Molino de Bolas				
Ensamblaje en 3D			Escala 1:9	Hoja 1/1



Autor Steve Cajas	Fecha de diseño 12/02/2024	Tutor Ing. Hernan Castillo	Fecha de revisión 14/02/2024	Estado de la máquina Laboratorio de minas
Dimensiones en mm del molino de bolas				
Lámina principal			Escala 1:9	Hoja 1/1

Anexo 10. Etapa constructiva















Anexo 11. Materiales indispensables para llevar a cabo la molienda





Anexo 12. Logo Personal del Molino de Bolas



Anexo 13. Certificación de traducción del resumen



Lic. Mónica Guarnizo Torres.
SECRETARIA DE "BRENTWOOD LANGUAGE CENTER"

CERTIFICA:

Que el documento aquí compuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del trabajo de titulación denominado "Diseño de un molino de bolas para probar material mineralizado en el Sur de Ecuador", del estudiante Stive Israel Cajas Pérez, con cédula de identidad No. 1105684532, egresado de la carrera de Ingeniería en Minas de la Universidad Nacional de Loja.

Lo certifica en honor a la verdad y autoriza a la interesada hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.

Loja, 23 de mayo de 2024

Lic. Mónica Guarnizo Torres
SECRETARIA DE B.L.C.

