

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

Los molinos de martillos han sido instrumentos fundamentales en la industria de procesamiento de materiales desde hace décadas. Su versatilidad y eficiencia los han posicionado como una herramienta indispensable en diversas aplicaciones, incluyendo la preparación de muestras para análisis en laboratorios. En el contexto educativo la implementación de un molino de martillo en el laboratorio de operaciones unitarias ofrece múltiples beneficios tanto para estudiantes como para docentes. Este equipo permite la realización de prácticas experimentales que facilitan la comprensión de conceptos teóricos relacionados con la reducción de tamaño, la molienda y la clasificación de partículas. Además, proporciona una herramienta práctica para el desarrollo de habilidades en el manejo y mantenimiento de equipos industriales.

La reducción de tamaño de partículas es una operación unitaria de gran relevancia en múltiples industrias, como la farmacéutica, alimentaria, química y metalúrgica. Este proceso influye directamente en las propiedades físicas y químicas de los materiales, afectando su reactividad, solubilidad, velocidad de disolución y otras características de interés. Los molinos de martillos, gracias a su mecanismo de impacto, son capaces de reducir el tamaño de partículas de una amplia variedad de materiales a dimensiones micrométricas, lo que los convierte en una herramienta versátil en laboratorios de investigación.

Diversos estudios y proyectos previos han demostrado la eficacia de los molinos de martillos en la trituración de materiales de diferentes características. Por ejemplo, investigaciones realizadas en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo han documentado el diseño y construcción de molinos de martillos para la trituración de granos secos de maíz y arveja, así como para la pulverización de yeso crudo. Estos proyectos han servido como referencia para el desarrollo de equipos similares en otras instituciones educativas y han contribuido al avance del conocimiento en el área de las operaciones unitarias.

El Laboratorio de Operaciones Unitarias (L.O.U) está equipado para apoyar las labores de docencia, investigación y extensión en el campo de los procesos químicos y las operaciones unitarias de la industria, además de asistencia técnica y análisis de los trabajos realizados por los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Química y Carreras afines.

Si bien la oferta comercial de equipos educativos ha venido aumentando paulatinamente. Los equipos que se encuentran en el mercado tienen un elevado costo, el cual no puede ser autofinanciado por el Laboratorio.

Por esta razón para el equipamiento del laboratorio de operaciones unitarias, existe la opción de realizar el diseño, montaje y puesta en marcha de equipos de laboratorio como proyecto de grado. De esta forma los estudiantes se familiarizan con un conjunto de actividades propias del quehacer profesional de la Ingeniería Química.

En el laboratorio de operaciones unitarias de la carrera de ingeniería química, se cuenta con varios tipos y tamaños de molinos, entre los que podemos mencionar un molino de bolas, un molino de discos y dos molinos de martillos. Estos equipos son fundamentales para la aplicación del avance teórico impartido en las clases con respecto a las operaciones unitarias más utilizadas en la industria, así mismo, la carrera de Ingeniería Química utiliza estos equipos con fines de investigación.

Los molinos de martillos disponibles actualmente en el laboratorio presentan diversas deficiencias debido al desgaste por el tiempo. Entre los principales problemas destaca el tamaño: uno de los molinos es demasiado pequeño, lo que obliga a realizar la alimentación de la materia prima de manera gradual, ocasionando pérdidas de tiempo; mientras que el otro es excesivamente grande para las pruebas habituales del laboratorio, lo que dificulta su uso eficiente.

Para atender las exigencias y necesidades de los estudiantes, se identificó la urgencia de contar con un equipo que permita realizar ensayos de manera eficiente y satisfactoria.

En respuesta a esta demanda, se decidió diseñar y construir un nuevo molino de martillos para el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU). La incorporación de este equipo no solo enriquecerá la experiencia práctica de los estudiantes, sino que también mejorará la calidad educativa al facilitar la comprensión y aplicación de conceptos complejos. Además, brindará a los docentes una herramienta valiosa para fortalecer la enseñanza teórica mediante prácticas más efectivas, impulsando así la investigación aplicada en el laboratorio.

Aplicaciones en laboratorios de operaciones unitarias

Los molinos de martillos encuentran numerosas aplicaciones en laboratorios de operaciones unitarias, entre las que destacan:

- **Preparación de muestras para análisis:** Molienda de sólidos para análisis químicos, físicos y mineralógicos.
- **Estudios cinéticos:** Análisis detallado de las velocidades de reacción y los mecanismos involucrados en los procesos de molienda, con el objetivo de comprender cómo varían las tasas de desintegración del material en función de factores como el tiempo, el tamaño de partícula, la energía aplicada y las condiciones operativas.
- **Desarrollo de nuevos productos:** Optimización de las propiedades de productos finales mediante la modificación del tamaño de partícula.
- **Investigación en procesos de separación:** Estudio de la influencia del tamaño de partícula en procesos de tamizado, filtración, sedimentación y centrifugación.

Beneficios para los Estudiantes:

1. **Aprendizaje Práctico:** Los estudiantes podrán aplicar los conceptos teóricos aprendidos en clase a través de experimentos prácticos, lo que facilita una comprensión más profunda y duradera.

2. **Desarrollo de Habilidades Técnicas:** Trabajar con equipos reales les permitirá desarrollar habilidades técnicas esenciales, como el manejo de maquinaria, la resolución de problemas, la realización de mediciones y correcciones precisas.
3. **Preparación Profesional:** La experiencia práctica con equipos industriales prepara a los estudiantes para enfrentar desafíos en sus futuras carreras, haciéndolos más competitivos en el mercado laboral.
4. **Investigación e Innovación:** Los estudiantes tendrán la oportunidad de participar en proyectos de investigación, contribuyendo al desarrollo de nuevas tecnologías y métodos en el campo de las operaciones unitarias.

Beneficios para los Docentes:

1. **Mejora en la Calidad de la Enseñanza:** Contar con equipos funcionales en el laboratorio permite a los docentes ofrecer una educación más completa y actualizada.
2. **Facilitación de la Investigación:** Los docentes podrán realizar investigaciones más avanzadas y detalladas utilizando el molino de martillos, experimentando con distintas variables como el tamaño de partícula, la velocidad de alimentación, la energía de impacto y el tipo de material procesado. Esto permitirá desarrollar estudios en áreas como la eficiencia energética, la optimización de procesos y el análisis de desgaste de materiales, contribuyendo al avance del conocimiento y promoviendo la innovación en el campo de la ingeniería y la tecnología de molienda.
3. **Colaboración Interdisciplinaria:** Este proyecto puede fomentar la colaboración entre diferentes departamentos y disciplinas, enriqueciendo el entorno académico y promoviendo un enfoque más holístico en la educación y la investigación.

JUSTIFICACIÓN

TÉCNICA

El diseño y construcción de un molino de martillos para el laboratorio de operaciones unitarias es esencial para proporcionar a los estudiantes una herramienta práctica que les permita comprender y aplicar los principios de reducción de tamaño de partículas cursados a lo largo de la carrera.

La construcción de este equipo ayudara a reafirmar y aplicar los conocimientos adquiridos dentro la carrera. Este equipo facilitará la trituración de materiales sólidos en partículas más pequeñas, lo cual es fundamental en diferentes procesos que requieren reducción de tamaño, por otro lado, el laboratorio contará con un molino que optimizará el proceso de molienda, además, el molino de martillos permite realizar experimentos controlados, optimizando variables como el tamaño de las partículas y la eficiencia de molienda.

ECONÓMICA

La Implementación de un molino de martillos para nuestro laboratorio representa una inversión estratégica que optimizará nuestros recursos y generará ahorros sustanciales a largo plazo. Al eliminar la dependencia de servicios externos de molienda, la universidad y los estudiantes reducirán significativamente sus costos operativos. Esta eficiencia permitirá redirigir los fondos ahorrados hacia otras áreas prioritarias, como la adquisición de materiales, el equipamiento y el desarrollo académico. Además, los estudiantes se beneficiarán de un acceso directo a un equipo de molienda, lo que les permitirá realizar experimentos de manera más autónoma y eficiente, acelerando así el avance de sus proyectos de investigación.

ACADÉMICA

Académicamente, la construcción de un molino de martillos para el laboratorio de operaciones unitarias enriquece la experiencia educativa de los estudiantes ya que abarca varias competencias de la formación de ingenieros, también proporciona una herramienta didáctica que facilita la comprensión de conceptos clave en ingeniería

química y de procesos. Este equipo permite realizar experimentos prácticos donde se aplicarán conocimientos teóricos, mejorando la calidad de la educación y preparando a los estudiantes para enfrentar desafíos en el ámbito profesional.

AMBIENTAL

La implementación de un molino de martillos en nuestro laboratorio no solo optimiza nuestros procesos internos, sino que también contribuye significativamente a reducir nuestra huella de carbono a nivel local. Cada vez que un usuario decide utilizar el equipo dentro del LOU, evita el transporte de materiales hacia y desde molinos externos, así eliminamos las emisiones asociadas al uso de vehículos de transporte a combustión. De esta manera, cada usuario del molino contribuye a disminuir la contaminación atmosférica y acústica en nuestra comunidad. Además, al optimizar los procesos de molienda, se puede reducir el consumo de energía y minimizar el impacto ambiental asociado.

PERSONAL

A nivel personal, participar en el diseño y construcción de un molino de martillos ofrece una oportunidad invaluable para desarrollar habilidades teóricas y prácticas en áreas como la ingeniería mecánica, la operación Metalúrgica, eléctricas y trabajo en equipo. Este proyecto permite aplicar conocimientos adquiridos durante la formación profesional a un contexto real, fomentando el aprendizaje activo y la resolución de problemas. Además, se adquieren conocimientos en procesos de molienda, desde la selección de los materiales, el funcionamiento y mantenimiento del equipo, también en un proyecto de este tipo puede ser un diferenciador importante en el currículum, demostrando capacidad de trabajo en equipo, capacidades técnicas y la adquisición de experiencia en el desarrollo de equipos con el fin de impulsar el crecimiento profesional y destacar en un mercado laboral cada vez más competitivo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de un molino de martillos compacto para el laboratorio de operaciones unitarias (LOU) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Definir la naturaleza de la materia prima.
- ❖ Identificar y caracterizar la materia prima.
- ❖ Determinar la capacidad de producción del molino de martillos.
- ❖ Seleccionar los materiales para la construcción del equipo.
- ❖ Desarrollar los cálculos de las partes que constituyen el molino de martillo.
- ❖ Elaborar los planos para la construcción del molino de martillos
- ❖ Construir el molino de martillos.
- ❖ Realizar un análisis de costos generados en el desarrollo del diseño y construcción del molino de martillos.
- ❖ Validar el funcionamiento del molino de martillos mediante pruebas de molienda con distintos granos y diferentes números de tamices.
- ❖ Desarrollar un manual de operación que garantice el óptimo funcionamiento de la máquina y la seguridad del operario en condiciones de trabajo.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1. 1. REDUCCIÓN DE TAMAÑO

El término de reducción de tamaño se aplica a todas las formas en las que las partículas de sólidos se pueden cortar o romper en piezas más pequeñas. Durante los procesos industriales, la reducción de tamaño de sólidos se lleva a cabo por diferentes métodos y con distintos fines. Las grandes piedras de un mineral crudo se desintegran hasta un tamaño manejable; los productos químicos sintéticos se muelen hasta quedar convertidos en polvo y las láminas de plástico se cortan en cubos pequeños o diamantes.

Los sólidos pueden romperse de diversas maneras, pero por lo común sólo se utilizan cuatro en los equipos de reducción de tamaño: compresión; impacto; frotación o rozamiento, y corte. En general, la compresión se utiliza para la reducción gruesa de sólidos duros, dando lugar a relativamente pocos finos; el impacto genera productos gruesos, medios o finos; la frotación produce productos muy finos a partir de materiales blandos no abrasivos. El corte da lugar a un tamaño definido de partícula y en algunas ocasiones también de forma definida, con muy pocos o nada de finos. (Operaciones Unitarias, McCabe, 2007, pág. 1029)

La reducción de tamaño se basa en varios principios y ecuaciones, como la teoría de Kick, la ley de Bond y la ecuación de Rittinger. Estas teorías describen la energía requerida para reducir partículas a diferentes tamaños y permiten predecir el comportamiento del material durante el proceso.

1. 1. 1. Mecanismos de Reducción:

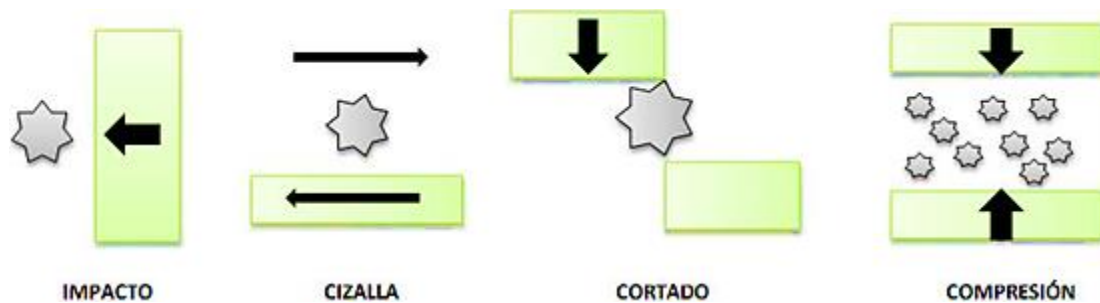
Las fuerzas mecánicas aplicadas a las partículas pueden generar diversos mecanismos de fractura, entre los que destacan:

- ❖ **Impacto:** Las partículas chocan entre sí o contra superficies duras, fragmentándose por la energía cinética. El impacto genera productos gruesos, medios o finos, indistintamente.

- ❖ **Cizalladura:** Las partículas se someten a fuerzas de corte, lo que produce su división. Conduce a productos muy finos de materiales blandos no abrasivos.
- ❖ **Abrasión:** Las partículas se desgastan por fricción al entrar en contacto con superficies rugosas. El corte da lugar a un tamaño definido de la partícula, a veces también determina su forma.
- ❖ **Compresión:** Las partículas son sometidas a fuerzas que las comprimen, generando grietas y fracturas. Se utiliza para la reducción tosca de partículas duras, dando lugar a pocos finos y muchas partículas gruesas.

Figura 1-1

Tipos de fuerzas que actúan en la reducción mecánica



Fuente: (*Blogger.com*, 2016)

La mayoría de los equipos de reducción de tamaño utilizan más de un tipo de fuerza (compresión, impacto, cizalla...) aunque generalmente una de ellas suele ser la predominante. La compresión es la acción característica de los trituradores. Los molinos emplean el impacto y frotación, algunas veces combinados con compresión; los molinos de ultrafinos operan en principio por agotamiento. Una acción de cortado es por supuesto una característica de cortadoras, troceadores y rajadores. (Operaciones Unitarias, McCabe, 2007, pág. 1034)

1. 1. 2. Energía para la reducción de tamaño

Una de las primeras investigaciones acerca de la distribución de la energía alimentada en un molino fue llevado a cabo por Owen quien concluyó que la energía es utilizada como sigue:

- a) **Deformación elástica de las partículas:** La energía se invierte en deformar las partículas del material antes de que se fracture, como estirar una banda elástica.
- b) **Fractura y reducción de tamaño:** Parte de la energía se utiliza para romper los enlaces entre las partículas, lo que resulta en una reducción del tamaño de las mismas.
- c) **Deformación elástica del equipo:** La maquinaria también se deforma elásticamente bajo la fuerza del impacto, consumiendo una parte de la energía.
- d) **Fricción entre partículas y equipo:** La fricción entre las partículas y las superficies del equipo genera calor y disipa energía.
- e) **Pérdidas por ruido, calor y vibraciones:** Una porción de la energía se convierte en ruido, calor y vibraciones, disipándose en el entorno.
- f) **Pérdidas por fricción interna:** La fricción interna dentro del material, durante el proceso de fractura y deformación, también consume energía.

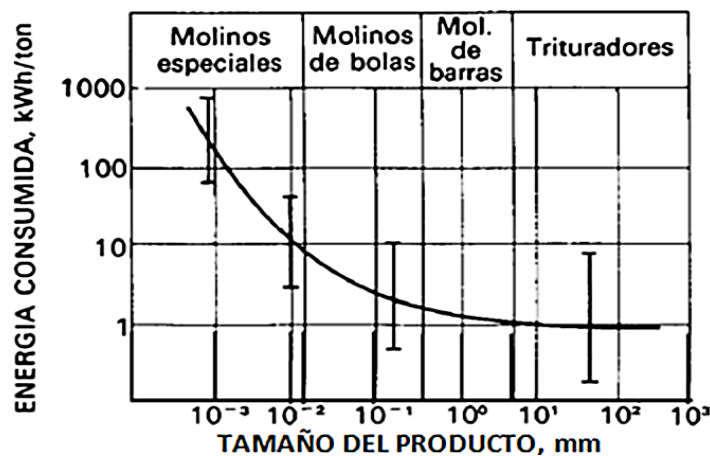
Owen estimó que solo el 10% de la potencia total es empleada útilmente. En otras palabras, la cantidad de energía consumida para desmenuzar una cierta cantidad de material depende todavía de las dimensiones iniciales y finales del producto molturado.

Sin embargo, debemos observar que en la práctica la energía que se debe transmitir a la máquina para obtener las dimensiones adecuadas es siempre superior al valor calculado con las reglas anteriores y esto es por el hecho de que el trabajo total exigido comprende:

- ❖ Trabajo para vencer la cohesión entre las partículas componentes de las partes a fracturar.
- ❖ El trabajo de deformación (deformación plástica y elástica).
- ❖ El trabajo absorbido por fricción entre los cuerpos molturantes.
- ❖ El trabajo absorbido por las vibraciones.
- ❖ El trabajo dispersado en calor.

Figura 1-2

Energía consumida para moler un producto



Fuente: (Guayllas Poma & Montero Vargas, 2012, pág. 22)

El coste energético es el de mayor importancia en trituración y molienda, de forma que los factores que controlan este coste son de gran interés. El trabajo necesario para forzarlas se almacena temporalmente en el sólido como energía mecánica de tensión, de la misma forma que la energía mecánica se puede almacenar en el sólido. Al aplicar una fuerza adicional a las partículas tensionadas, éstas se distorsionan más allá de su resistencia final y bruscamente se rompen en fragmentos, generándose nuevas superficies. Puesto que una unidad de área de sólido posee una cantidad definida de energía superficial, la creación de nuevas superficies requiere un trabajo, que es suministrado por la liberación de energía de tensión cuando la partícula se rompe. De acuerdo con el principio de conservación de la energía, toda la energía en exceso sobre la energía de la nueva superficie creada ha de aparecer en forma de calor.

1. 1. 3. Equipos para la reducción de tamaño

Los equipos para la reducción de tamaño se dividen en trituradores, molinos, molinos de ultrafino y máquinas de corte.

Los trituradores realizan el trabajo pesado de romper las piezas grandes de materiales sólidos en pequeños pedazos. Un triturador, en principio, opera con un material extraído de una mina, aceptando todo lo que venga de la mina y rompiéndolo en pedazos de 150 a 250 mm (6 a 10 in.). Un triturador secundario reduce estos pedazos a partículas quizá de tamaño de 6 mm (1/4 – in.)

Los molinos reducen el producto del triturado hasta formar un polvo. El producto procedente de un molino intermedio puede pasar a través de un tamiz de 40 mallas; la mayor parte del producto que sale de un molino fino pasará a través de un tamiz de 200 mallas con una abertura de 74 μm . Un molino ultrafino acepta como alimentación partículas no mayores de 6 mm (1/4 – in.); el tamaño del producto generado es típicamente de 1 a 50 μm .

Las cortadoras producen partículas de tamaño y forma definidos, de 2 a 10 mm de longitud.

Tabla I-1

Equipos para reducción de tamaño de partículas.

A	Quebrantadoras de mandíbula	- <i>Blake</i> - <i>Excéntrico superior</i> - <i>Dodge</i>
B	Trituradoras giratorias	- <i>Primarias</i> - <i>Secundarias</i> - <i>De cono</i>
C	Molinos de impacto para trabajos pesados	- <i>Rompedoras de rotor</i> - <i>Molinos de martillos</i> - <i>Impactores de jaula</i>

D	Quebrantadores de rodillos	- <i>Rodillos lisos (dobles)</i> - <i>Rodillos dentados (de uno o de dos rodillos)</i>
E	Molinos de bandejas secas y de fileteado	
F	Desmenuzadores	- <i>Desmenuzadores dentados</i> - <i>Desintegradores de jaulas</i> - <i>Molinos de disco</i>
G	Cortadoras y rebanadoras rotatorias	
H	Molinos con medios de molienda.	- <i>Molinos de bolas, piedras, varillas y compartimientos</i> - <i>Molinos agitados de bolas y arenal</i> - <i>Molinos vibratorios</i>
I	Molinos de velocidad periférica media	- <i>Molinos de anillo y rodillos y de taza</i> - <i>Molinos de rodillos, tipo cereal</i> - <i>Molinos de rodillos, tipos para pintura y caucho</i>
J	Molinos de alta velocidad periférica	- <i>Molinos de martillos para molienda fina</i> - <i>Molinos de clavijas</i>
K	Molinos hidráulicos superfinos	- <i>De chorro centrífugo</i> - <i>De chorro opuesto</i> - <i>De chorro con yunque</i>

Fuente: (Perry et al., n.d., 8-22)

1. 1. 1. Aplicaciones Industriales

La reducción de tamaño es fundamental en numerosas industrias, desde la minería y la metalurgia hasta la farmacéutica y la alimentaria. En la industria alimentaria, la reducción de tamaño puede facilitar procesos de extracción, aumenta la reactividad de los sólidos, permite la separación por métodos mecánicos de ingredientes no deseados y reduce el tamaño de un material fibroso para su fácil tratamiento.

La reducción de tamaño en la industria se realiza por las siguientes razones:

- ❖ Facilita la extracción de un constituyente deseado que se encuentre dentro de la estructura del sólido.
- ❖ Se pueden obtener partículas de tamaño determinado cumpliendo con un requerimiento específico del alimento, como ejemplo la azúcar para helados, preparación de especias y refinado del chocolate.
- ❖ Aumento de la relación superficie-volumen incrementando, la velocidad de calentamiento o de enfriamiento, la velocidad de extracción de un soluto deseado, etc.
- ❖ Si el tamaño de partículas de los productos mezclarse es homogéneo y de tamaño más pequeño que el original, la mezcla se realiza más fácil y rápido, como sucede en la producción de formulaciones, sopas empaquetadas, mezclas dulces, entre otros. (Repotenciación y automatización del molino de martillo, 2018, pág. 36)

1. 2. MOLIENDA

1. 2. 1. Definición

La molienda es un proceso mecánico que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra mediante medios mecánicos, siendo los más empleados la compresión, impacto, frotamiento de cizalla dependiendo del aparato. La molienda es una operación de transformación física de la materia prima sin alterar su naturaleza. Usualmente se habla de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a 1" (1" = 2.54cm).

Este proceso se realiza en dispositivos denominados molinos, que utilizan diversos mecanismos (como bolas, rodillos o martillos) para desintegrar los materiales en partículas más pequeñas. La molienda es fundamental en numerosas industrias, incluyendo la minería, la alimentaria y la farmacéutica, donde se prepara la materia prima para etapas posteriores de procesamiento.

1. 2. 2. Objetivos de la molienda

Los principales objetivos de la molienda son:

- ❖ **Aumento de la Superficie Específica:** Incrementar la superficie de las partículas permite mejorar la eficiencia de procesos químicos y físicos, como la disolución y las reacciones químicas.
- ❖ **Liberación de Componentes Valiosos:** En la minería, la molienda facilita la separación de minerales valiosos de la ganga.
- ❖ **Facilitación del Manejo:** Reducir el tamaño de las partículas simplifica su transporte y almacenamiento.
- ❖ **Preparación de Materiales para Procesos Posteriores:** En la industria alimentaria, la molienda de granos es un paso esencial para la producción de harinas y otros productos derivados.

1. 2. 3. Tipos de Molienda

Molienda Seca

Este tipo de molienda se realiza sin la presencia de líquidos. Es común en la industria del cemento y en la preparación de alimentos secos, y reduce el riesgo de contaminación por humedad.

Molienda Húmeda

Se lleva a cabo en presencia de agua u otros líquidos, mejorando la eficiencia del proceso y la uniformidad de las partículas. Es usada en la minería y en la preparación de pastas y purés en la industria alimentaria.

1. 2. 4. Clasificación de la molienda

La molienda se puede clasificar según el tamaño de partícula final deseado:

- ❖ **Molienda gruesa:** Reduce el tamaño de partículas grandes a tamaños intermedios. Se utiliza en la primera etapa de muchos procesos de molienda.
- ❖ **Molienda media:** Reduce el tamaño de partículas de tamaño intermedio a tamaños más finos.
- ❖ **Molienda fina:** Produce partículas muy finas, con un tamaño inferior a 75 micrómetros.

Tabla I-2

Tamaño de molienda en función del tipo de molino.

A	Quebrantadores (Gruesos y finos)	1. Quebrantadores de mandíbula. (100 a 300) mm 2. Quebrantadores giratorios. (50 a 150) mm 3. Quebrantadores de rodillos. (10 a 50) mm
B	Molinos (Intermedios y finos)	1. Molinos de martillos; impactores. (1 a 10) mm 2. Molinos de rodadura-compresión. (0.5 a 5) mm a. Molinos de rulos. b. Molinos de rodillos. 3. Molinos de frotación. (0.1 a 1) mm 4. Molinos de volteo. (0.1 a 2) mm a. Molinos de barras b. Molinos de bolas; molinos de guijarros. c. Molinos de tubos; molinos de compartimentos.
C	Molinos de ultrafino	1. Molinos de martillos con clasificación interna. (0.01 a 0.1) mm 2. Molinos que utilizan la energía de un fluido. (0.01 a 0.1) mm 3. Molinos agitados. (0.01 a 0.1) mm

Fuente: Elaboración propia, 2024.

La molienda ultrafina de polvos secos se realiza con molinos tales como molinos de martillos de alta velocidad, provistos de un sistema de clasificación interna o externa, y con molinos de chorro o que utilizan la energía de un fluido. La molienda húmeda de ultrafinos se realiza en molinos agitados.

Tabla I-3

Clasificación de equipos de reducción de tamaño

	Tamaño de alimentación (mm)	Tamaño de producto (mm)
Trituradoras gruesas	1500–40	50–5

	Tamaño de alimentación	Tamaño de producto
	(mm)	(mm)
Trituradoras intermedia	50–5	5–0.1
Trituradoras fina	5–2	0.1
Molinos coloidales	0.2	Menos de 0.01 μm

Fuente: (Richardson, Harker, & Backhurst, 2002, pág. 104)

1. 2. 5. Variables de la operación

Para la reducción del tamaño de los sólidos, tiene importancia su contenido en humedad. Cuando es inferior a 3 ó 4 % en peso no surgen dificultades apreciables; por el contrario, la presencia de esta pequeña humedad ejerce, en realidad, una acción beneficiosa en la reducción de tamaños, en especial por la gran disminución que determina en la cantidad de polvo. Cuando el contenido en humedad excede del 4 %, muchos materiales se vuelven pastosos y adherentes, tendiendo a atascar las máquinas, especialmente en las etapas grosera e intermedia. Un gran exceso de agua (50 % o más) facilita la operación porque arrastra a la alimentación hacia la zona de acción, y al producto pulverizado hacia fuera de la misma, al propio tiempo que proporciona un medio de transporte de los sólidos por la fábrica en forma de suspensión o papilla. Por lo general, la molienda húmeda se aplica en la etapa más fina de la reducción de tamaños.

La llamada relación o cociente de reducción, es la relación existente entre el diámetro medio de la alimentación y el del producto. Muchas de las máquinas de trituración grosera poseen una relación de reducción entre 3 y 7. Los molinos para finos pueden poseer hasta un cociente de reducción de 100. (Operaciones básicas, Brown, 1995, pág. 27)

1. 3. LEYES DE DESINTEGRACIÓN E ÍNDICE DE TRABAJO

Las leyes de trituración propuestas hace varios años por Rittinger y Kick han probado su aplicación sólo sobre un intervalo muy limitado de condiciones. Una

manera más realista de estimar la energía requerida para trituración y molienda fue la propuesta por Bond.

1. 3. 1. Teoría de Rittinger

La ley de desintegración propuesta por Rittinger en 1867 establece que el trabajo que se requiere para la desintegración es proporcional a la nueva superficie creada. Esta «ley», que realmente no es más que una hipótesis, es equivalente a establecer que la eficacia de desintegración n_c es constante y, para una máquina y material de alimentación dados, es independiente de los tamaños de la alimentación y del producto. Si las esfericidades Φ_a y Φ_p son iguales y la eficacia mecánica es constante, la ley de Rittinger se puede expresar de la siguiente forma:

$$E = \frac{P}{\dot{m}} = K_R \left(\frac{1}{\bar{D}_{pp}} - \frac{1}{\bar{D}_{pa}} \right) \quad (1)$$

Dónde:

E : Energía requerida por unidad de masa (kW-h/ton)

K_R : Constante de Rittinger

$\bar{D}_{pp}$: Diámetro medio de las partículas del producto (mm)

$\bar{D}_{pa}$: Diámetro medio de las partículas alimentadas (mm)

La ley de Rittinger es aplicable principalmente a aquella parte del proceso en la que una nueva superficie está siendo creada y mantiene correctamente para una molienda de finos donde el incremento de superficie por unidad de masa de material es grande. La ley de Rittinger tiene limitaciones al momento de ser aplicada, ya que es aplicable para rangos entre 50 y 0.05 mm.

1. 3. 2. Ley de Bond

Este método es uno de los más acercados a la realidad en los cálculos experimentales obtenidos en la molienda. Bond postuló que el trabajo requerido para formar partículas de tamaño D_p a partir de alimentaciones muy grandes es proporcional a la raíz cuadrada de la relación de la superficie al volumen del producto s_p / v_p .

$$E = \frac{P}{\dot{m}} = \frac{k_B}{\sqrt{D_p}} \quad (2)$$

Donde:

$$k_B = \sqrt{100 \times 10^{-3} W_i} = 0.3162 W_i \quad (3)$$

Reemplazando

$$E = \frac{P}{\dot{m}} = \frac{0.3162 W_i}{\sqrt{D_p}} \quad (4)$$

Donde:

k_B : Constante de Bond

E : Energía requerida por unidad de masa (kW-h/ton)

W_i : Índice de trabajo de impacto o índice de bond (kWh/t)

D_{pp} : Diámetro medio de las partículas del producto (mm)

D_{pa} : Diámetro medio de las partículas alimentadas (mm)

El cálculo de la resistencia de un material al momento de ser triturado propuesto por Bond, se convirtió en el método principal para la caracterización de circuitos convencionales de molienda y actualmente se considera la base para el dimensionamiento de nuevas unidades en esta operación.

1. 3. 3. Ley de Kick

La ecuación propuesta por Kick en el año de 1885, basada en el análisis de esfuerzos de la deformación plástica dentro del límite de elasticidad, y establece que el trabajo que se requiere para triturar una masa dada de material es constante para la misma relación de reducción, o sea, la relación entre el tamaño inicial de las partículas y el tamaño final de las mismas. Esto supone que la energía requerida está relacionada directamente a la relación de reducción $\frac{L_1}{L_2}$, lo que indica que la energía requerida para fraccionar una cantidad dada de material de 50 mm a 25 mm de tamaño es la misma

que la requerida para reducir el tamaño de 12 mm a 6 mm. En las ecuaciones anteriores k_R y k_K son conocidas respectivamente como constante de Rittinger y constante de Kick.

$$\frac{P}{m} = k_K f_c \ln \frac{L_1}{L_2} \quad (5)$$

La ley de Kick, está más relacionada a la energía requerida para efectuar una deformación elástica antes que la fractura ocurra, y es más exacta que la ley de Rittinger para un fraccionamiento de superficies irregulares donde la cantidad de superficie producida es considerablemente baja. (Diseño y construcción de un molino de martillos con tamiz intercambiable, Guayllas & Montero, 2012, pág. 24)

1. 4. MOLTURABILIDAD

La molturabilidad es la cantidad de producto de un molino en particular que satisface una especificación dada por unidad de tiempo de molienda (por ejemplo, toneladas/hora atravesando una malla 200), por lo que se lo relaciona con la velocidad de molienda de un material para un molino en concreto.

El principal propósito del estudio de la molturabilidad consiste en evaluar el tamaño, el tipo de molino que se requiere para producir un tonelaje específico y las necesidades de energía para la molienda. Hay tantas variables que afectan la molturabilidad que este concepto se utiliza sólo como una guía aproximada para dimensionar el molino, sin hacer referencia alguna a la distribución del tamaño del producto, el tipo o el tamaño del molino.

Entre los factores importantes que determinan la molturabilidad están la dureza, la elasticidad, la resistencia a la divisibilidad, la molturabilidad se relaciona con el módulo de elasticidad con la velocidad del sonido a través del material. (Diseño y construcción de un molino de martillos con tamiz intercambiable, Guayllas & Montero, 2012, pág. 34)

La molturabilidad de un material afecta directamente los costos operativos y el rendimiento del proceso de molienda. Un material con alta molturabilidad requiere menos energía para ser molido, lo que resulta en una mayor eficiencia del proceso. Por

el contrario, materiales con baja molturabilidad pueden aumentar significativamente el consumo energético y el desgaste del equipo, incrementando los costos operativos.

1. 5. MOLINO

El término molino se utiliza para describir una gran variedad de máquinas, diseñadas específicamente para llevar a cabo la reducción de tamaño de partículas; transformando materiales sólidos de mayor tamaño en partículas más finas. Se utilizan para disminuir las dimensiones físicas de las partículas sólidas a través de la aplicación de fuerzas mecánicas.

En principio es posible predecir el tamaño que debería tener un molino industrial para lograr una determinada capacidad a partir de datos obtenidos en ensayos continuos en escala de laboratorio, siempre que se conozcan las correspondientes leyes de escalamiento. En la práctica es difícil obtener una similitud exacta entre el molino industrial y el molino de laboratorio. Por otra parte, cuando el molino de laboratorio se elige suficientemente grande para obtener una buena similitud, el ensayo se convierte en escala piloto.

1. 5. 1. Principio de Funcionamiento

Los molinos operan aplicando fuerzas mecánicas a las partículas, lo que provoca su fractura y reducción de tamaño. Estas fuerzas pueden ser de compresión, impacto, abrasión o cizalladura, dependiendo del diseño del molino. El mecanismo exacto por el cual se produce la fragmentación de las partículas depende de las propiedades del material a moler (dureza, fragilidad, tamaño inicial) y de las características del molino (tipo de mecanismo de molienda, velocidad de rotación, carga de alimentación).

Los molinos son equipos indispensables en numerosos procesos industriales. La selección del molino adecuado depende de las características del material a moler y los requisitos del proceso. Al comprender los principios de funcionamiento de los molinos y los factores que afectan la molienda, es posible optimizar los procesos y obtener productos de alta calidad.

Un triturador, un molino o un cortador funciona adecuadamente hasta que: 1) la alimentación es de un tamaño idóneo y entra a una velocidad uniforme; 2) el producto se elimina tan pronto como es posible después de que las partículas alcanzan el tamaño deseado; 3) el material irrompible se mantiene fuera de la máquina, y 4) en la reducción de baja fusión o productos sensibles al calor, se elimina el calor generado en el molino.

1. 5. 2. Tipos de molinos

Tabla I-4*Características de los molinos*

TIPO DE MOLINO	FUERZA INCOLUCRADA	VARIABLES	ELEMENTOS DE MOLIENDA	APLICACION
MOLINO DE MARTILLOS	Impacto Cizalla	- Velocidad de operación. - Numero de martillos. - Velocidad de alimentación. - Tamaño de grano. - Tamaño de criba	Martillos: - Fijos - Colgantes - Dentados - Lisos - Afilados	- Solidos cristalinos duros. - Productos fibrosos.
MOLINO DE DISCOS	Cizalla	- Separación entre discos. - Velocidad de alimentación. - Fuerza de cizallamiento.	Discos de: - Cizalla - Estirados - Dientes	- Alginato - Pimienta - Pectina - Paprika - Verduras deshidratadas
MOLINO DE RODILLOS	Compresión Cizalla	- Velocidad de rotación de rodillos. - Velocidad de alimentación.	Rodillos: - Lisos - Estriados - Corrugados	- Molienda fina. - Molienda intermedia. - Almidones.

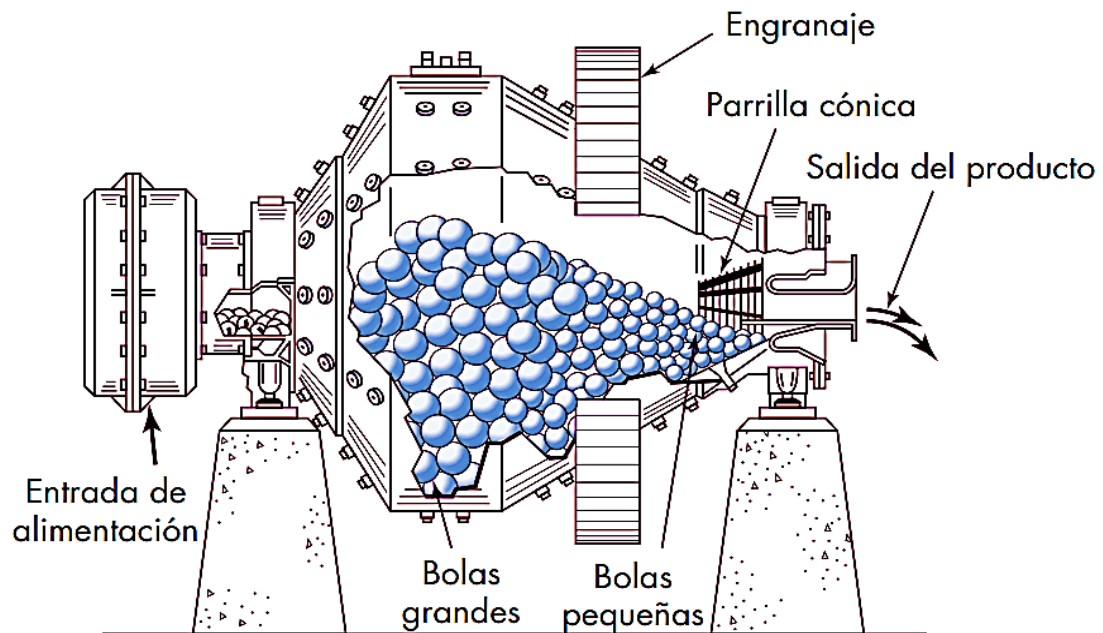
TIPO DE MOLINO	FUERZA INCOLUCRADA	VARIABLES	ELEMENTOS DE MOLIENDA	APLICACION
MOLINO DE BOLAS		- Distancia de separación entre rodillos. - Angulo de atrape.		
	Impacto	- Velocidad de operación.	Bolas de:	- Molienda fina.
	Cizalla	- Tiempo de molienda.	- Acero	- Molienda ultrafina.
	Centrifuga	- Velocidad de alimentación.	- Cerámica	- Alimentos duros y abrasivos.
			- Piedras	- Colorantes.
TRITURADORAS	Compresión	- Longitud.		
	Cizalla	- Diámetro de rodillos. - Velocidad de rotación.		- Partículas finas.

Fuente: (Gutierrez Vilela, 2018, pág. 19)

Actualmente existen diversos tipos de molinos utilizados para diferentes funciones en distintas áreas de la industria, a continuación, se describen los más conocidos y utilizados:

1. 5. 2. 1. Molino de bolas o cilindros

Un molino de bolas consiste en una carcasa cilíndrica que gira muy lento alrededor de un eje horizontal y está llena aproximadamente hasta la mitad de su volumen con un medio sólido de molienda. La carcasa es por lo general de acero, con un recubrimiento de una lámina placa de acero al alto carbono, porcelana, roca de sílice o caucho. El medio de molienda consiste en bolas de metal, caucho o madera.



Fuente: (Operaciones Unitarias, McCabe, 2007, pág. 1038)

Las esferas giran dentro de un cilindro, triturando las partículas por impacto y abrasión.

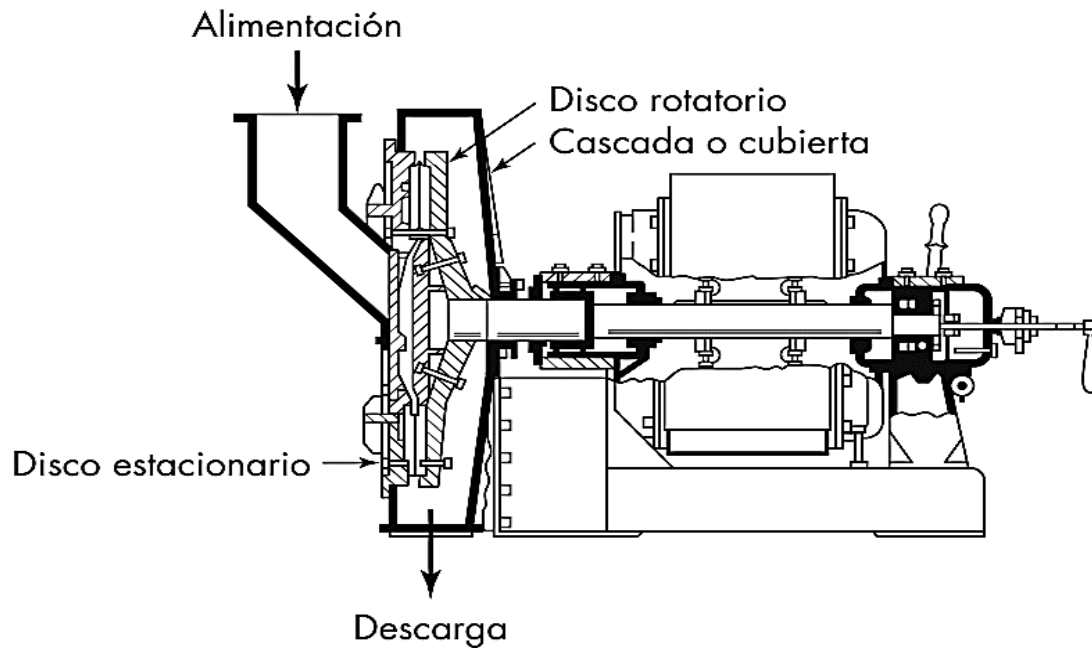
Ideales para molienda fina y ultrafina. Pero resultan inadecuados para la reducción intermedia y fina de materiales abrasivos.

Aplicaciones: Industria química, farmacéutica, cerámica.

1. 5. 2. 2. Molinos de discos:

Similares a los molinos de rodillos, pero utilizan discos con ranuras o estrías. En un molino de atrición, las partículas de sólidos blandos son frotadas entre las caras planas estriadas de unos discos circulares rotatorios. En un molino de rotación simple

uno de los discos es estacionario y el otro gira en una máquina de doble rotación ambos discos giran a alta velocidad en sentidos contrarios.



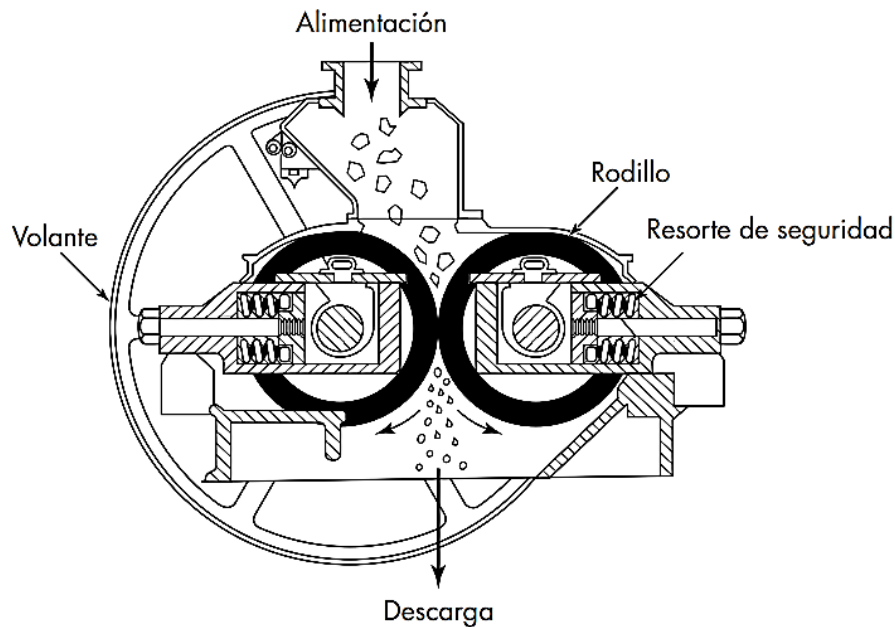
Fuente: (Operaciones Unitarias, McCabe, 2007, pág. 1037)

Son utilizados para molienda fina y media.

Aplicaciones: Industria de la alimentación, química.

1. 5. 2. 3. *Molino de rodillo*

En los molinos de rodillos, los sólidos son atrapados y triturados entre rodillos cilíndricos verticales y un gran anillo. Los rodillos se mueven a velocidades En los molinos de rodillos, los sólidos son atrapados y triturados entre rodillos cilíndricos verticales y un gran anillo. Los rodillos se mueven a velocidades constantes.

Figura 1-3*Molino de rodillos*

Fuente: (Operaciones Unitarias, McCabe, 2007, pág. 1035)

Existen diferentes tipos de rodillos para esta máquina, pues puede estar compuesta de rodillos lisos o corrugados, también existen los rodillos estriados de sierra para acompañar la trituración con una acción cortante. Generalmente los rodillos cuentan con un sistema de regulación de espacio entre los mismos para ajustar el tamaño de la partícula del material procesado.

Características

- ❖ Emplean rodillos que giran en direcciones opuestas, comprimiendo y desmenuzando el material.
- ❖ Producen partículas de tamaño uniforme y fino. Son adecuados para materiales duros y abrasivos.
- ❖ Aplicaciones: Industria de la pintura, cerámica, alimentos

1. 5. 2. 4. *Molino de martillos*

Los Molinos de Martillos son máquinas para la reducción de tamaño de partículas que han sido ampliamente utilizados en el área de procesamiento de alimentos, siendo el preferido en la elaboración de alimento para animales, pero en general para granos friables y no fibrosos como el maíz, trigo, cebada, entre otros. Su operación sencilla, versatilidad de procesamiento, bajo requerimiento de mantenimiento y reducido número de componentes simples de fabricar, también los ha hecho populares en la producción a baja escala. (Mavares, Chavarri, Rada, & Gil, 2020)

1. 5. 2. 4. 1. *Características*

El molino de martillos es el tipo de máquina desintegradora de mayores aplicaciones, pueden tratar casi cualquier producto: sólidos fibrosos como cortezas o cuero, virutas de acero, pastas blandas y húmedas, arcilla plástica o una roca dura.

Los martillos pueden ser barras rectas de metal con los extremos planos o alargados, o bien afilados para formar un borde cortante. Dado que las barras de martillos están articuladas, la presencia de cualquier material duro no causa daños al equipo. Las barras se reemplazan fácilmente cuando se desgastan.

El tamaño del producto se regula mediante el tamaño de la criba y la velocidad de rotación. Para obtener una molienda fina están limitados a los materiales más blandos. A continuación, se listan las características más sobresalientes de un molino de martillo.

- ❖ Alta proporción de trituración y bajo consumo de energía.
- ❖ Sistema de martillos fijos u oscilatorios.
- ❖ Facilidad de cambiar sus piezas, fácil realizar la respectiva limpieza.
- ❖ Ocupan poco espacio y tienen gran capacidad de molienda.
- ❖ Cuentan con una boca de alimentación grande y un diseño moderno y seguro con deflector para evitar que el producto regrese.
- ❖ Tolva de descarga con salida directa del producto.

1. 5. 2. 4. 2. Partes del molino de martillos

1. Sistema de Alimentación

Tolva de alimentación: Es el punto de entrada del material a moler y lo introduce en la cámara de molienda de manera controlada. Una tolva adecuada garantiza una alimentación continua y homogénea del material.

Alimentador: Dispositivo que regula el flujo de material hacia la cámara de molienda, evitando sobrecargas.

2. Cámara de Molienda

Carcasa: Es el corazón del molino de martillos, contiene los martillos y *la criba*; *aquí* es donde se produce la molienda. Su diseño influye en el flujo del material y la eficiencia de la molienda.

Martillos: Son los elementos de impacto que realizan la trituración del material. Golpean el material, rompiéndolo en partículas más pequeñas. Están hechos de materiales resistentes al desgaste para prolongar su vida útil.

Rotor: Es el componente que sostiene y hace girar los martillos. Al girar a alta velocidad, el rotor impulsa los martillos para que impacten y trituren el material. Su diseño y equilibrio son cruciales para un funcionamiento suave y eficiente del molino.

3. Sistema de Descarga

Tamiz o criba: Elemento perforado que retiene las partículas de mayor tamaño, permitiendo el paso de las partículas más finas, mientras retiene las partículas más grandes para una mayor trituración. El tamaño de las perforaciones determina el tamaño máximo de partícula del producto final.

Conducto de salida: Conduce el producto final hacia el siguiente proceso o hacia un colector, evitando la acumulación de material en la cámara de molienda.

4. Sistema de Transmisión

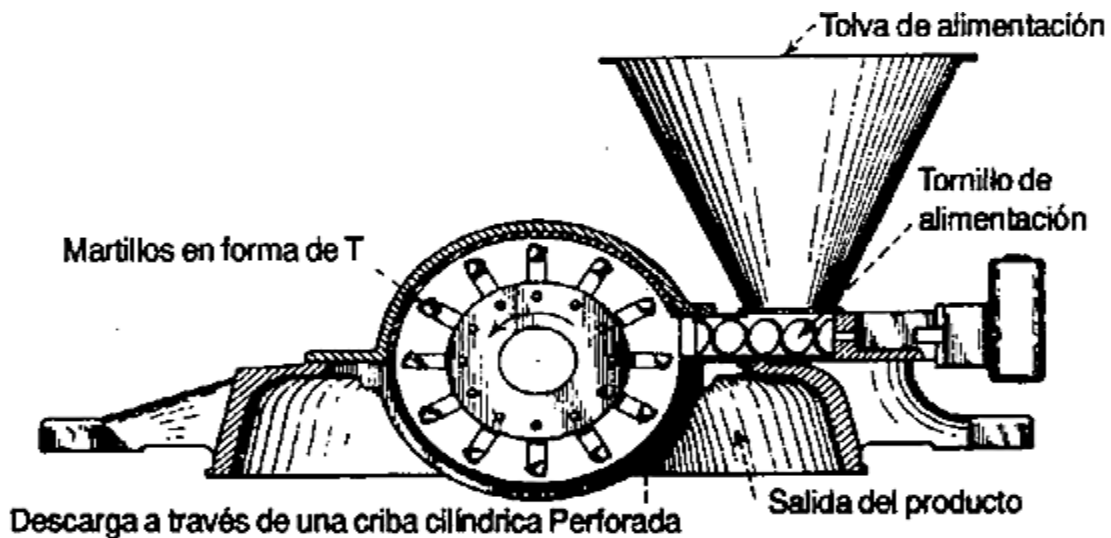
Motor: El motor eléctrico cumple la función fundamental de convertir la energía eléctrica en energía mecánica. Esta energía mecánica es la fuerza motriz que permite

que las partes móviles del molino, como el eje, los martillos o los rodillos, realicen el trabajo de molienda o trituración.

Transmisión: Conjunto de elementos mecánicos (correas, poleas, engranajes) que transmiten el movimiento y la potencia del motor al rotor.

Figura 1-4

Partes de un molino de martillos



Fuente: (Perry, 2009, págs. 8-43)

El primer dispositivo que recibe el material a entrar a la máquina es el alimentador, este tiene como función acondicionar el flujo entrante para asegurar la entrada de la cantidad correcta de producto a procesar.

1. 5. 2. 4. 3. Principio de funcionamiento

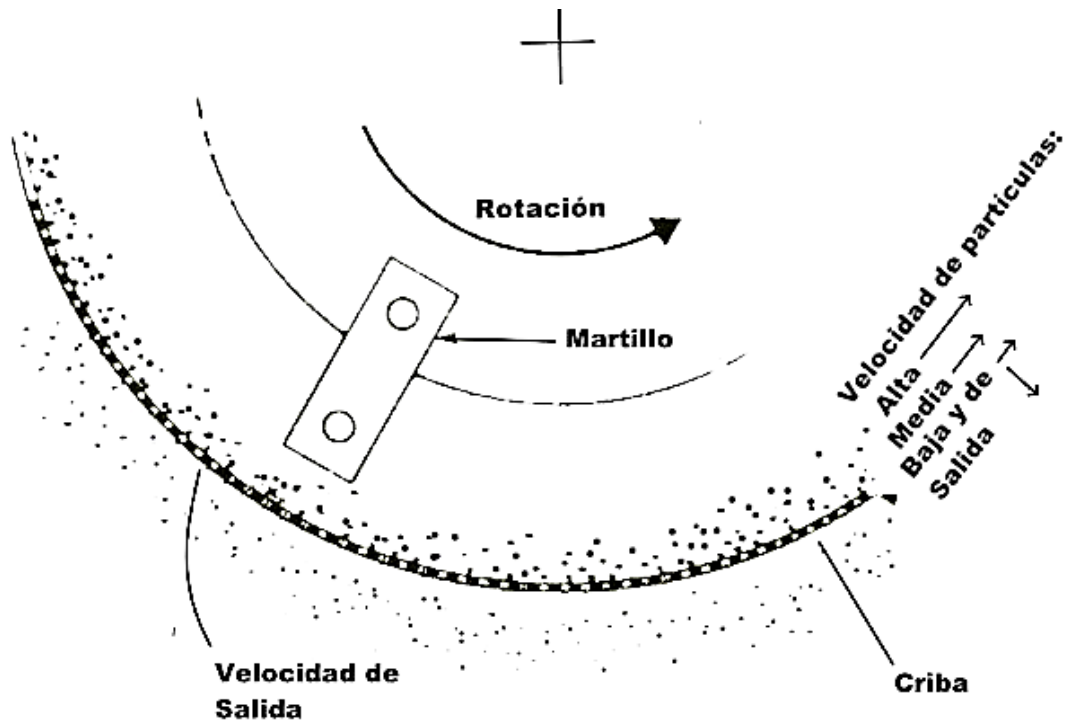
El principio de reducción de tamaño del molino resulta de una acción combinada de impacto y atrición. Estos molinos contienen un rotor que gira a gran velocidad en el interior de una carcasa cilíndrica. Por lo general el eje es horizontal.

La alimentación entra por la parte superior de la tolva de donde por acción de la gravedad cae al interior de la cámara de desintegración en esta, los martillos golpean el producto que se encuentra en el interior del molino, chocando contra la cámara de

desintegración, y nuevamente golpeado por los martillos, esto ocurre sucesivamente hasta que el producto alcance su tamaño mínimo cae a través de una abertura situada en el fondo.

Figura 1-5

Principio de trabajo de Molino de Martillos



Fuente: (Mavares, Chavarri, Rada, & Gil, 2020)

El material granular en la cámara de molienda es golpeado por los martillos, que se mueven a una alta velocidad tangencial en el orden de 40-130m/s dependiendo de la operación deseada y el material a moler. Las partículas reducidas comienzan a rotar en la cámara guiadas por la forma de la criba y por la corriente de aire creada por los martillos. Una capa móvil de material fragmentado se forma, la parte más cercana a los martillos se mueve a alta velocidad por la influencia de los mismos y forma un gradiente a medida que se aleja de los martillos hasta llegar a la criba, donde la fricción la frena. La interacción entre las partículas con movimiento relativo en el gradiente es lo que crea la zona de molienda por atrición. Al alcanzar el tamaño adecuado, los

fragmentos con velocidad adecuada pasan a través de las aberturas de la criba y son descargados de la máquina.

1. 5. 2. 4. 4. Ventajas y desventajas

Los molinos de martillo se fabrican en un gran número de tipos y tamaños y se utilizan en una mayor variedad de materiales suaves que cualquier otra clase de maquinaria. (Perry et al., n.d., 8-43)

Ventajas	Desventajas
- Fácil construcción - Bajo costo de los repuestos - Disponibilidad de una amplia gama de tamaños - Larga duración de los martillos - La eficiencia no reduce mientras se encuentra en funcionamiento - Mantenimiento simple - Opera en un sistema cerrado reduciendo el riesgo de explosión y contaminación cruzada	- La calidad de molienda no es buena si los granos presentan humedad - Puede producir elevadas temperaturas en la cámara de molienda - Puede generar ruidos y emisiones de polvo. - No hay uniformidad en el tamaño de partículas.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

1. 5. 3. Método de Bond para el diseño de molinos

El objetivo del método es seleccionar el diámetro y largo de un molino para producir Q toneladas por hora de un material con un porcentaje Ψ menor que el tamaño P_i . Se debe especificar además las condiciones de los martillos y la potencia del molino.

El método consta de seis etapas importantes:

- 1) Un ensayo de “moliendabilidad” normalizado para el material, o datos tabulados recogidos en un molino prototipo.

- 2) Una ecuación empírica que convierte los resultados de los ensayos de moliendabilidad a los que se obtendrían en un molino continuo, con descarga.
- 3) Relaciones de escalamiento que permiten predecir el resultado en molinos mayores.
- 4) Una serie de factores de corrección, basados en la experiencia, que permiten describir otras condiciones de operación.
- 5) Una ecuación empírica que permite calcular la energía específica consumida para una determinada razón de reducción.
- 6) Una ecuación empírica que permite calcular la potencia necesaria para mover un molino en función de la masa de medios de molienda.

Por comparación de ensayos realizados en la etapa 1 con resultados experimentales de molienda a escala piloto, Bond concluyó que el material se podía caracterizar mediante un parámetro que denominó Índice de Trabajo W_{iT} y que relacionó con la moliendabilidad del ensayo. (Diseño y construcción de un molino de martillos con tamiz intercambiable, Guayllas & Montero, 2012, pág. 20)

1. 6. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO QUE DETERMINAN LA SELECCIÓN DE LA MÁQUINA

La selección de la máquina de molienda adecuada es un aspecto crítico en los procesos industriales. La elección correcta no solo garantizará la eficiencia del proceso sino también la calidad del producto final.

El primer paso en el diseño de un Molino de Martillos para aplicaciones de alimentos es la consideración de todos los productos que serán procesados. El factor determinante en la selección son las características intrínsecas del material a moler. Estas características determinarán el tipo de equipo más eficiente y efectivo para lograr el tamaño de partícula deseado.

Las diferencias de productividad que pueda existir varían considerablemente según el cereal, por lo que es esencial considerarlo durante el dimensionamiento general de la máquina.

Los cereales presentan una gran variedad de propiedades debido a la diferencia en su estructura y composición química, éstas se extienden a su respuesta y a la acción de impacto del Molino de Martillos.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Química, es esencial conocer:

- ❖ Las leyes por las que se rige el fenómeno de desintegración, en especial por lo que se refiere a la energía necesaria para llevarlo a cabo.
- ❖ Las características de los productos producidos
- ❖ Los tipos de máquina que se pueden emplear y en el campo específico donde pueda ser empleado.

A continuación, se presentan las principales características a considerar:

1. 6. 1. Propiedades Físicas

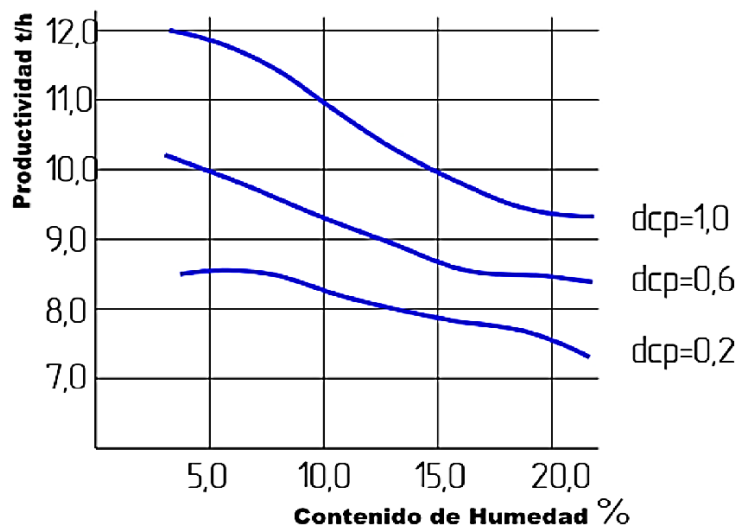
- ❖ **Dureza:** La dureza del material influye en la selección del tipo de molino. Materiales más duros requieren equipos de mayor potencia y resistencia al desgaste.
- ❖ **Fragilidad:** Materiales frágiles se fragmentan fácilmente y pueden requerir equipos de impacto o compresión.
- ❖ **Tamaño de partícula inicial:** El tamaño de las partículas a moler influye en la selección del tipo de molino y su capacidad.
- ❖ **Densidad:** La densidad del material influye en la carga de alimentación del molino y en la eficiencia del proceso de molienda.
- ❖ **Forma de las partículas:** Partículas alargadas o irregulares pueden requerir un pre-triturado antes de la molienda fina.
- ❖ **Humedad:** El contenido de humedad del material puede afectar el proceso de molienda. La humedad puede provocar la adhesión de las partículas y disminuir la eficiencia de la molienda.

La humedad afecta considerablemente la interacción del grano durante el impacto y permite la agrupación de partículas molidas en pastas que bloquean y tapan la descarga a través de la criba. Aunque es una propiedad que se debe estudiar en el

aspecto productivo, también tiene su influencia en el diseño de estos equipos. Cuando la humedad entra en la consideración, ésta afecta la estructura del cereal, específicamente lo hace más suave, funciona como un plastificante logrando que tenga mayor capacidad de absorber la energía del impacto, por lo que, para poder lograr la misma productividad, un Molino de Martillos debe invertir más energía a medida que aumenta la humedad.

Figura 1-6

Relación entre el contenido de humedad y la productividad de un Molino de Martillos



Fuente: (Mavares, Chavarri, Rada, & Gil, 2020)

En la práctica se utiliza la regla de 7% de aumento de potencia consumida por cada 1% mayor de humedad en el producto para hacer estimaciones de diseño.

Cuando la humedad proviene en la materia prima, se puede incorporar un secador para llevarlo al nivel adecuado. Sin embargo, también ocurre la liberación de humedad dentro de los granos en la cámara de molienda mientras son procesados, en este caso se requiere la incorporación de un sistema que provea el flujo de aire adecuado correspondiente con el diseño del molino y el producto.

1. 6. 2. Propiedades Químicas

- ❖ **Abrasividad:** La abrasividad del material afecta el desgaste de las piezas del molino. Materiales altamente abrasivos requieren equipos con componentes de alta resistencia al desgaste ya que pueden causar un desgaste rápido de las partes del molino.
- ❖ **Reactividad:** Materiales reactivos pueden generar calor o gases durante la molienda, lo que requiere equipos con sistemas de enfriamiento o ventilación adecuados.
- ❖ **Toxicidad:** Materiales tóxicos requieren equipos con sistemas de contención para evitar la dispersión de polvo.
- ❖ **Higroscopicidad:** Materiales higroscópicos pueden absorber humedad durante la molienda, afectando la calidad del producto final.

1. 6. 3. Propiedades Reológicas

- ❖ **Viscosidad:** Materiales viscosos pueden obstruir las aberturas del molino y reducir la eficiencia de la molienda.
- ❖ **Plasticidad:** Materiales plásticos pueden deformarse en lugar de fragmentarse.

1. 7. SEPARACIONES MECÁNICAS

Una unidad de molienda real no da lugar a un producto uniforme, independientemente de que la alimentación sea o no de un tamaño uniforme. El producto siempre consta de una mezcla de partículas, en un intervalo de tamaño variable desde un tamaño máximo definido hasta un mínimo submicroscópico. Algunas máquinas, en especial de la clase de molinos, están diseñadas para controlar el tamaño de las partículas más grandes en sus productos, pero en cambio las más finas no están bajo control.

1. 7. 1. Tamizado

El tamizado es un método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas. El tamizado consiste en la separación de una mezcla de

partículas de diferentes tamaños en dos o más fracciones, cada una de las cuales estará formada por partículas de tamaño más uniforme que la mezcla original.

El análisis granulométrico de los productos de molienda se realiza mediante tamizado en serie, donde las partículas se clasifican según su tamaño al pasar a través de una secuencia de tamices de abertura decreciente. Esta técnica permite evaluar la eficiencia de molienda y controlar la distribución de tamaños de partícula en el producto final.

1. 7. 1. 1. *Balances de masas aplicados a los tamices:*

A un tamiz pueden aplicarse balances de materia sencillos que resultan útiles para calcular relaciones de alimentación, cernido y rechazos a partir de los análisis por tamizado de las tres corrientes y el conocimiento del diámetro de corte deseado. Sean F , D y B las velocidades de flujo másico de la alimentación, de la corriente de rechazos y de la corriente de cernidos, respectivamente, y x_F , x_D y x_B la fracción másica del material cernido en estas tres corrientes. Las fracciones másicas del material de menor tamaño en la alimentación, cernido y rechazo son $1 - x_F$, $1 - x_D$ y $1 - x_B$. Puesto que toda alimentación que entra en el tamiz tiene que salir como flujo de cernidos o como flujo de rechazos,

$$F = D + B \quad (6)$$

El material A contenido en la alimentación debe salir en estas dos corrientes y

$$Fx_F = Dx_D + Bx_B \quad (7)$$

Eliminando B de las ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se obtiene

$$\frac{D}{F} = \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} \quad (8)$$

Eliminando D resulta

$$\frac{B}{F} = \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} \quad (9)$$

1. 7. 2. Tamiz

Un tamiz es una malla metálica constituida por barras tejidas y que dejan un espacio entre sí por donde se hace pasar el compuesto solido previamente triturado o molido.

El material que no atraviesa los orificios del tamiz se designa como rechazo o fracción positiva, y el que lo pasa se llama tamizado o fracción negativa. Utilizando más de un tamiz, se producen distintas fracciones de tamizado y pueden designarse según los tamaños de los orificios o según el número de mallas por unidad de superficie, utilizados en la separación. (Operaciones básicas, Brown, 1995, pág. 10)

1. 7. 2. 1. Serie de tamices Tyler

Los tamices normales Tyler fueron los primeros en ser ofrecidos a los laboratorios comerciales que utilizaron este sistema. Esta serie de tamices está basada sobre un tamiz de 200 mallas con un hilo de 0,0021 pulgadas (0,05334 mm) de espesor, y con una abertura de 0,0029 pulgadas (0,0074 cm). Los otros tamaños varían según una razón fija igual a $\sqrt{2}$. Otra colección de tamices, para tamaños intermedios a los anteriores, permite completar la serie. Para la serie completa resulta entonces una razón igual a $4\sqrt{2}$.

Figura 1-7*Serie de tamices Tyler*

Fuente: (Tamiz agitador, s.f.)

1. 7. 2. 2. *Eficiencia de un tamiz.*

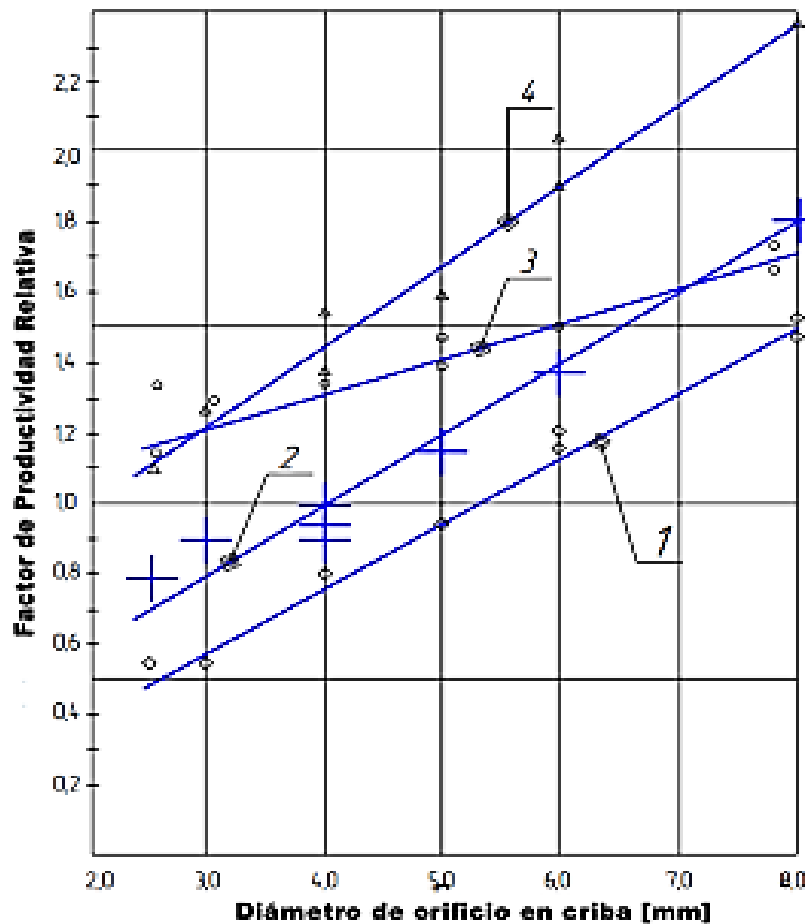
Para obtener la máxima eficiencia, la capacidad debe ser pequeña, y grandes capacidades se obtienen sólo a expensas de una reducción de la eficiencia. En la práctica es deseable un equilibrio razonable entre capacidad y eficiencia.

La oportunidad total de paso de una partícula de un tamaño inferior determinado es una función del número de veces que la partícula incide contra la superficie del tamiz y de la probabilidad de paso durante un solo contacto. Si el tamiz es sobrecargado, el número de contactos es pequeño y la oportunidad de paso como consecuencia del contacto está limitada por la presencia de otras partículas

A medida que se reduce el tamaño de la partícula, el tamizado se vuelve progresivamente más difícil, y la eficiencia es, en general, baja para partículas de tamaños menores de 150 mallas (0.1 mm). (Operaciones Unitarias, McCabe, 2007, pág. 1054)

Figura 1-8

Productividad de un molino de martillos respecto a los orificios de la criba



Nota: Factor 1 es para cebada en un tamiz de Ø4mm de orificio). 1.- Avena; 2.- Cebada; 3.- Trigo; 4.- Maíz.

Fuente: (Mavares, Chavarri, Rada, & Gil, 2020)

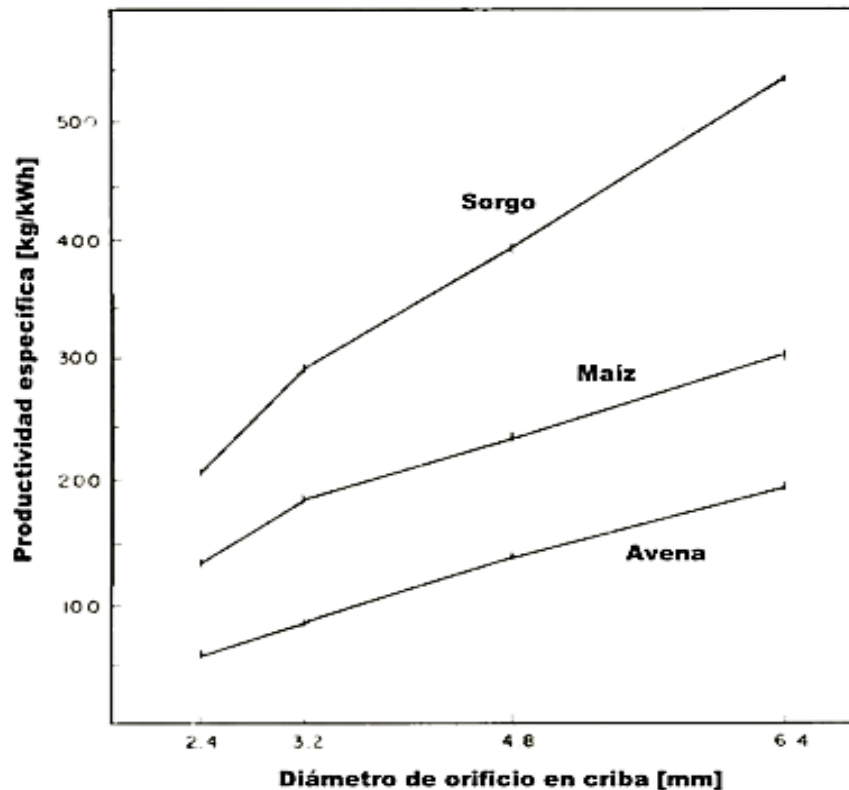
Se puede observar que para la misma abertura de criba pueden existir diferencias tan grandes como un 60% más de producción, como en el caso de la avena y el maíz con criba de Ø8mm de aberturas.

La productividad no es el único factor a considerar para decidir si un cereal en particular es más o menos fácil de reducir con un molino de martillos, es de interés observar la potencia consumida por el equipo, por lo que las curvas de comportamiento

son presentadas en función de la capacidad específica que corresponde a cuántos kg/h se producen por cada kW invertido en el procesamiento.

Figura 1-9

Productividad específica del molino de martillos.



Fuente: (Mavares, Chavarri, Rada, & Gil, 2020)

También se puede observar que hay diferencias en la magnitud de la relación entre los indicadores de productividad, para una criba de Ø6,4mm la productividad específica del sorgo es casi 3 veces mayor que la de la avena, mientras que el maíz es casi 2 veces mayor que la de la avena. Esto indica que el sorgo y el maíz son más fáciles de moler que la avena.

Se ha podido evidenciar mediante la gráfica que existen diferencias considerables tanto de magnitud de productividad como en el efecto de las aberturas de la criba en ésta, para distintos cereales. Esto implica que las características físicas del grano dictarán en

cierta medida la energía requerida para molerlos, resultado de su resistencia a la energía provista durante la colisión y la facilidad con la que pueden pasar por las aberturas de la criba. (Diseño de Molinos de Martillos, 2020)

La eficiencia se calcula con la cantidad de producto y la alimentación. En la que se debe cumplir que $B=C+R$, tomando en cuenta que B es la cantidad de alimentación, C es el producto y R la suma de los rechazos (Bermeo, s.f., pp. 7-8).

Conociendo estos datos se puede obtener varios índices granulométricos de importancia como:

❖ **Índice de cernido (I_c):** cálculo que se realiza para obtener la fracción de finos.

$$I_c = \frac{C}{B} 100 \quad (10)$$

❖ **Índice de rechazo (I_R):** Calculo de los gruesos retenidos en los tamices.

Dónde:

$$I_R + I_c = 100 \quad (11)$$

Estos cálculos son obtenidos para el método de separación por medio de tamizado en cascada, el mismo que es usualmente utilizado.

De aquí parte la eficiencia de los finos calculada mediante la siguiente formula:

$$E_f = I_c \frac{F_c}{F_A} \quad (12)$$

Dónde:

E_f : Eficiencia de finos

I_c : Índice de finos

F_c : Finos en el producto

F_A : Finos en la alimentación

1. 7. 3. Análisis granulométrico

Para realizar un análisis por tamizado deberá comenzarse por limpiar los tamices con una brocha o pincel fino y golpearlos ligeramente para librarles de cualquier partícula adherida. Después se encajan los tamices entre sí, colocando el de 300 mallas en la parte superior, y el más fino, de 200 mallas, en el fondo de la columna. Completan la colección un recipiente colector bajo el tamiz del fondo y una tapa sobre el tamiz superior.

Se carga una cantidad conocida de material en el tamiz superior, que se cubre con la tapa. El conjunto se somete, a un movimiento de rotación y de choque (zarandeo). La agitación se prolonga durante 15 a 20 minutos, después de este tiempo, los finos, 200 mallas, se recogen en el recipiente del fondo. Retirado dicho material se agita de nuevo para comprobar si aparecen o no más productos finos. Cuando no aparece nuevo material al fondo del recipiente, indica que la operación de tamizado ha terminado, posteriormente se desmontan los tamices con objeto de pesar las distintas fracciones. El producto que pasó el tamiz de 100 mallas y quedó retenido sobre el de 150 mallas se designa como. fracción 100/150 ó -100 + 150. (Operaciones básicas, Brown, 1995, pág. 18)

1. 7. 3. 1. Porcentaje de cernido

Es el producto que atraviesa el tamiz y se define como la diferencia entre 100 y % de retenido acumulado:

$$\% \text{cernido} = 100 - \% \text{Retenido acumulado} \quad (13)$$

1. 7. 3. 2. Porcentaje de retenido

Del peso total de la muestra

$$\% \text{Retenido} = \frac{\text{Peso del material retenido en el tamiz}}{\text{Peso total de la muestra}} 100 \quad (14)$$

1. 7. 3. 3. *Diámetro Medio*

El diámetro medio de partícula de una mezcla de sólidos es un concepto que requiere aplicación prudente. La palabra «medio» tiene la significación de un compuesto individual, representativo de un grupo de muestras parecidas, pero no idénticas. Por tratarse de una propiedad «media», debe ser susceptible de multiplicarse por el número total de muestras del grupo, para obtener el valor total de dicha propiedad. Así, multiplicando el diámetro medio por el número total de partículas: resulta la suma de todos los diámetros del grupo. La superficie media es el valor que permite hallar, de igual modo, el área total del sólido. También el volumen medio y el peso medio son el volumen y el peso que, multiplicados por el número de partículas, dan el volumen y el peso totales. (Operaciones básicas, Brown, 1995, pág. 21)

De las partículas retenidas entre dos tamices consecutivos, se expresa como la media aritmética de la abertura de la malla (I_1) de las mismas:

$$D_2 = I_1 + \frac{I_2}{2} \quad (15)$$

$$D_2 = I_2 + \frac{I_3}{2} \quad (16)$$

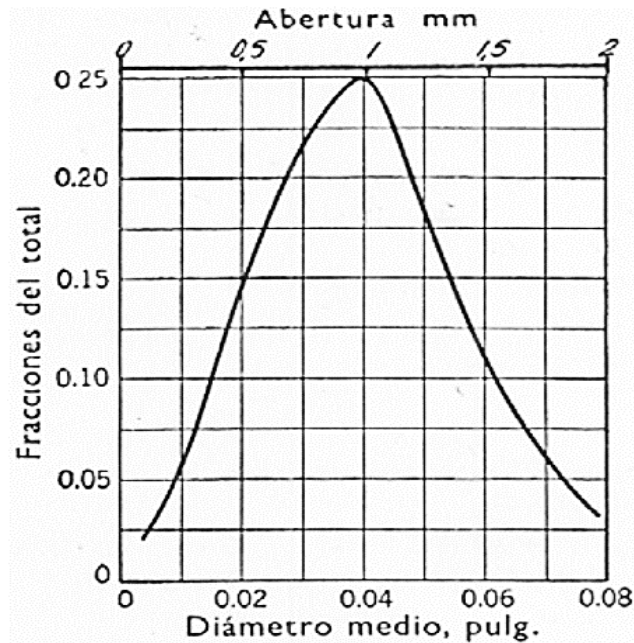
Donde:

D_2 = diámetro medio

I_1 = media aritmética de la abertura de la malla

1. 7. 3. 4. *Diagramas Granulométricos*

Las curvas trazadas se utilizan, sobre todo para mostrar la distribución por tamaños de las partículas de una mezcla. Estas representaciones son muy útiles para un observador experimentado, pero resultan confusas cuando se comparan. (Operaciones básicas, Brown, 1995, pág. 20)

Figura 1-10*Diagrama granulométrico*

Fuente: (Brown, 1995)

Es frecuente expresar los resultados del análisis granulométrico representándolos gráficamente. Los más utilizados son el Distributivo o Secuencial y el Acumulado.

Diagrama distributivo o secuencial:

Se obtiene representado en un eje de coordenadas los porcentajes que quedan retenidos en cada tamiz, frente a los diámetros medios.

Diagrama acumulado:

Pueden referirse a rechazos o a cernidos y se obtienen representando los porcentajes acumulados frente al diámetro medio de las partículas. (Diseño y construcción de un equipo mixto de molienda, Samaniego & Estrada, 2012, pág. 32)

1. 8. GRANOS Y CEREALES

1. 8. 1. Definición

Cereales: Los cereales son un grupo de plantas pertenecientes a la familia Poaceae, también conocida como gramíneas, que producen granos utilizados tanto en la alimentación humana como animal. Los más conocidos y cultivados globalmente incluyen el trigo, maíz, arroz, avena, sorgo y cebada. A excepción del arroz, que a menudo se consume entero, los granos de estos cereales se procesan habitualmente para obtener productos derivados como harinas y sémolas.

Los cereales se transforman en una amplia gama de productos alimenticios mediante procesos de molienda, cocción y fermentación. La calidad de la harina, que se obtiene moliendo y tamizando el endosperma del trigo, es crucial y puede verse afectada por el almacenamiento adecuado y la ausencia de contaminantes. (FAO.ORG, 2015)

Figura 1-11

Cereales más consumidos



Fuente: (Aleaimage, 2010)

Legumbres: Las leguminosas son plantas que pertenecen a la Familia Fabaceae, que se distinguen por producir frutos tipo vainas que contienen

semillas en su interior, producen entre 1-12 granos o semillas de tamaño, forma y colores variables dentro de una vaina.

Según la FAO, el término "legumbres" se limita a las plantas que se cultivan únicamente para obtener el grano (o semilla) seco. En esta denominación se excluyen los cultivos cosechados verdes para alimento (por ejemplo, guisantes verdes, judías verdes), ya que estos se clasifican como verduras; también se excluyen los cultivos utilizados principalmente para la extracción de aceite (denominados semillas oleaginosas) como soja y maní. Los cultivos leguminosos que se utilizan exclusivamente para fines de siembra (semillas de trébol y alfalfa).

Los frijoles secos, lentejas y guisantes son los tipos de legumbres más comúnmente conocidos y consumidos. (Araneda, 2024)

Figura 1-12

Legumbres más consumidas



Fuente: (Las legumbres vuelven en otoño, 2022)

1. 8. 2. Propiedades de los granos.

La dureza y la forma en que se fracturan los cereales y las legumbres son propiedades importantes que influyen en procesos como la molienda. Por ejemplo, los cereales duros son más adecuados para la producción de harinas integrales, mientras que los cereales más blandos se utilizan para la elaboración de productos como copos de avena.

La forma en que se fracturan los cereales y las legumbres afecta directamente a la textura de los productos finales. Una fractura más fina puede resultar en una textura más suave, mientras que una fractura más gruesa puede dar lugar a una textura más crujiente.

1. 8. 2. 1. Dureza

Cereales: La dureza de los cereales varía según el tipo y la variedad. Algunos, como el maíz, tienen una cubierta externa más resistente, mientras que otros, como el arroz, tienen una textura más suave. La dureza influye en la textura final del producto.

Legumbres: Las legumbres también presentan diferentes grados de dureza, lo que se debe en gran medida a la composición de su cubierta externa. Las legumbres secas son generalmente más duras que las frescas.

1. 8. 2. 2. Fractura

Cereales: Al someterse a fuerzas, los cereales pueden fracturarse de diferentes maneras, dependiendo de su estructura interna y de la fuerza aplicada. Algunos se rompen en fragmentos más o menos regulares, mientras que otros pueden presentar una fractura más irregular.

A continuación, un listado de algunos granos con mayor fuerza de fractura:

Tabla I-5*Fuerza máxima de fractura de granos*

Grano	Fuerza Máxima de Fractura (N)
Maíz	250-350
Trigo	200-300
Arroz	150-200
Avena	100-150
Cebada	120-180
Quinoa	90-130
Mijo	110-160

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Legumbres: La fractura de las legumbres también varía según su variedad y las condiciones de almacenamiento. Generalmente, las legumbres secas se fracturan con mayor dificultad que las frescas.

A continuación, un listado de algunas legumbres con mayor dureza:

Tabla I-6*Fuerza máxima de fractura de legumbres*

Grano	Fuerza Máxima de Fractura (N)
Frijol	100-150
Lentejas	80-120
Garbanzos	90-130
Habas	110-160
Arvejas secas	100-140

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En general, los cereales tienden a tener una mayor fuerza de fractura en comparación con las legumbres. Esto se debe a las diferencias en la estructura y composición de las paredes celulares de estos granos.

CAPÍTULO II
ESTUDIO TÉCNICO PRELIMINAR

2. ESTUDIO TÉCNICO PRELIMINAR

2. 1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto está destinado al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de ingeniería Química, en instalaciones del campus universitario de la universidad Autónoma Juan Misael Saracho, ubicado en el barrio El Tejar sobre la avenida Víctor Paz Estenssoro, ciudad de Tarija.

Tabla II-1

Ubicación geográfica del proyecto

Latitud	21°32'39.13"S
Longitud	64°43'22.85"O
Rango Altitudinal	1854 m.s.n.m.
Clima	Temperatura promedio 25 °C

Fuente: Google Earth Pro, 2024.

Figura 2-1

Referencia de la ubicación del proyecto



Fuente: Elaboración propia, 2024.

2. 2. MÉTODOS

El proyecto de investigación se enfoca en entender cómo ocurre la molienda de granos/legumbres y el tamizado posterior para crear una curva granulométrica. Se utilizará una guía de procedimientos que proporcionará pautas lógicas para lograr los objetivos de manera eficiente

Entre los métodos se tiene:

2. 2. 1. Inductivos

Este procedimiento implica recopilar datos sobre la dureza del mineral y la potencia requerida para la molienda. Luego, se utilizan estos datos para diseñar el molino de manera adecuada. En resumen, se parte de detalles específicos para llegar a conclusiones más generales.

2. 2. 2. Deductivos

Este procedimiento se basa en descomponer un problema en partes más pequeñas. Comienza con reglas o principios generales y los aplica a situaciones específicas. En nuestro caso, el proceso de tamizado divide el mineral molido en diferentes fracciones para crear la curva granulométrica

2. 2. 3. Experimental

El Experimental aplica la observación de fenómenos, que en primer momento es sensorial. Con el pensamiento abstracto se elabora la hipótesis y se diseña el experimento con el fin de reproducir el objeto de estudio, controlando el fenómeno para probar la validez de la hipótesis.

- **Observación Científica:** La observación científica consiste en mirar detenidamente una parte pequeña del mundo o grupo de cosas. Luego, anotamos lo que vemos, organizamos esos datos y elegimos los más importantes. Así, podemos entender mejor lo que estamos estudiando.

- **Método de la Medición:** A partir del cual surge todo el complejo empírico-estadístico. Con lo cual se podrá determinar la relación entre el tiempo y la velocidad del proceso de molienda y tamizado y así el rendimiento del mismo.

2. 3. INGENIERÍA DEL PROYECTO

2. 3. 1. Caracterización de la materia prima

Para caracterizar la materia prima hay que enfatizar algunas propiedades de los granos como partícula individual y sobre las cuales se centra el estudio de comportamientos de las partículas sólidas en la reducción de tamaño. Conocer las propiedades físicas y mecánicas de los granos a procesar permite seleccionar y diseñar el equipo adecuado para maximizar la eficiencia y la calidad del producto final.

2. 3. 1. 1. *Maíz*

Maíz (*Zea mays*), Cereal originario de América, es uno de los principales cultivos a nivel mundial. Se utiliza tanto en la alimentación humana como animal y para la producción de biocombustibles. Tiene alto contenido en carbohidratos, y se puede consumir en múltiples formas, como en tortillas, harinas y palomitas. (Fao, 2024).

2. 3. 1. 2. *Frijol*

Frijol (*Phaseolus vulgaris*), Legumbre esencial en muchas dietas a nivel mundial, especialmente en América Latina. Es rico en proteínas, fibra, vitaminas del grupo B y minerales como el hierro y el magnesio. Se consume cocido y se utiliza en platos como frijoles negros o rojos. (Fao, 2024).

2. 3. 1. 3. *Trigo*

Trigo (*Triticum spp.*), Cereal que constituye la base de la alimentación de millones de personas. Se utiliza para hacer harinas que son el ingrediente principal en la elaboración de pan, pasta y otros productos. Es rico en carbohidratos, y contiene también proteínas como el gluten. (Fao, 2024).

2. 3. 1. 4. *Propiedades físicas de la materia prima*

Tabla II-2

Propiedades físicas de la materia prima

Grano	Tamaño Promedio (mm)	Forma	Distribución Granulométrica	Densidad aparente (g/cm³)	Humedad
Trigo	Longitud: 5-7	Alargada y cilíndrica	Relativamente uniforme	Aprox. 0.78	13-15%
	Ancho: 2-3				
Maíz	Longitud: 6-12	Redondeada y algo aplanada	Moderadamente variable	Aprox. 0.72	10-13%
	Ancho: 4-8				
Frijol	Longitud: 10-15	Elíptica ligeramente aplanada.	Moderadamente variable	Aprox. 0.80 g/cm ³	5-9%
	ancho: 5-8				

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2. 3. 1. 5. *Propiedades Mecánicas de la materia prima*

Tabla II-3

Propiedades mecánicas de la materia prima

Grano	Dureza	Fuerza de Fractura (N)	Abrasividad
Trigo	Moderada a alta	200-300	Baja
Maíz	Alta	274.71 a 356.29	Baja a moderada
Frijol	Moderada a alta	100-150	Moderada

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2. 3. 1. 6. Composición química de la materia prima

Tabla II-4

Composición química de la materia prima

Grano	Proteínas	Carbohidratos	Fibra
Trigo	10-15%	60-70%	2-3%
Maíz	7-10%	60-70%	2-3%
Frijol	20-25%	50-60%	4-5%

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2. 3. 1. 7. Resistencias de las Muestras.

Para la evaluación de resistencia se tomó referencias bibliográficas, de ensayos de dureza de Vickers y la friabilidad de los granos.

Dureza Vickers: Es una medida de la resistencia a la deformación permanente y es más alta en materiales como el maíz debido a su estructura más compacta.

Friabilidad: Mide la tendencia de un material a desintegrarse o romperse bajo presión mecánica. Las habas y lentejas tienden a ser más friables debido a su estructura interna menos compacta.

Tabla II-5

Dureza de Vickers/Friabilidad

Cereal/Legumbre	Dureza Vickers (HV)	Dureza en N/mm ²	Friabilidad
Trigo	20-40 HV	20-40 N/mm ²	Baja a moderada
Maíz	50-70 HV	50-70 N/mm ²	Baja
Frijoles secos	40-60 HV	40-60 N/mm ²	Moderada a alta

Fuente: Cruz Valerio, G.(2016). *Desgranadora de maíz* (proyecto final). Instituto superior poza rica de Veracruz Material de construcción

2. 3. 1. 8. Acero

El acero LAC PNAV A131 presenta una excelente combinación de propiedades mecánicas que lo hacen adecuado para la construcción del prototipo de un molino de martillos destinado al uso académico. Sus características técnicas clave, como un límite de fluencia de 235 MPa y una carga de rotura de 400-520 MPa, aseguran que el acero podrá soportar las cargas estáticas y dinámicas inherentes al proceso de molienda de granos y cereales, reduciendo el riesgo de deformación o fallas estructurales prematuras.

La elongación mínima del 22-24% indica que el material posee suficiente ductilidad para absorber impactos repetidos, lo que es fundamental en un equipo que estará sometido a vibraciones y fuerzas dinámicas durante la operación de molienda. Este nivel de elongación permite un margen de seguridad en situaciones de sobrecarga o choques mecánicos.

Desde un punto de vista de manufactura, la laminación en caliente del acero facilita su mecanizado, corte y soldadura, lo cual es ventajoso para la fabricación de las diversas piezas del molino. Esta facilidad de trabajo permite optimizar los tiempos de producción y reducir costos sin comprometer la calidad del equipo.

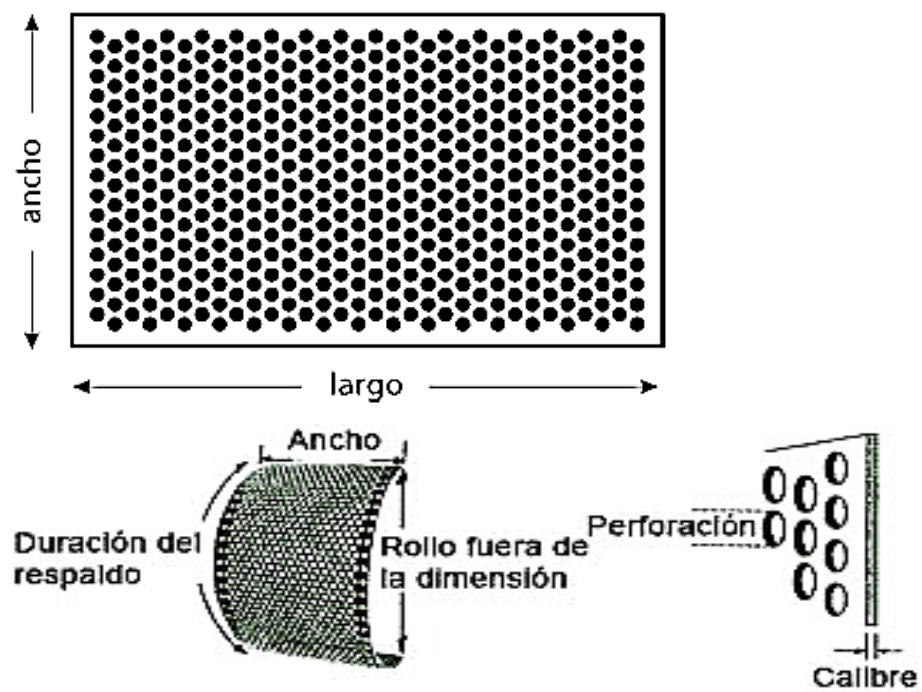
Si bien el PNAV A131 no es un acero inoxidable, es la mejor opción ante la humedad en comparación a otros aceros al carbono, su uso en embarcaciones está plenamente justificado debido a su alta resistencia mecánica, ductilidad, facilidad de fabricación y comportamiento ante la humedad. Estos factores permiten que el molino construido con este material opere de manera segura y eficiente en ambientes húmedos. Esto demuestra que el acero PNAV A131 es una solución viable y económica para construcciones que demandan alta resistencia y durabilidad en condiciones exigentes.

Tabla II-6*Propiedades Mecánicas del acero al carbono A131*

NORMA TECNICA	GRADO	LIMITE DE FLUENCIA MPa $\geq$	CARGA DE ROTURA MPa	ELONGACION % $\geq$
ASTM A131/A131M	A	235	400-520	24(2") 21(8")
LRS, BV, ABS	A	235	400-520	22(8")

Fuente: Corporación Aceros Arequipa. (2023). *Ficha técnica: PNAV A131.***Zaranda de acero inoxidable:**

La construcción de las zarandas en acero inoxidable no solo garantiza mayor durabilidad y resistencia a la corrosión, sino que también asegura la calidad e inocuidad del proceso de molienda en un entorno académico. Este material ofrece un equilibrio óptimo entre resistencia, facilidad de limpieza y precisión en la granulometría, lo que las convierte en una elección ideal para este tipo de aplicación.

Tabla II-7*Cribas del molino***Fuente:** (FamSun, 2020)

CAPÍTULO III
PARTE EXPERIMENTAL

3. PARTE EXPERIMENTAL

3. 1. PARÁMETROS DE DISEÑO

Para diseñar el equipo se tomará en cuenta la naturaleza de la materia prima.

Tabla III-1

Características de la materia prima para el dimensionamiento

Materia prima	Masa (g)	Volumen (m³)	Densidad (g/m³)
Maíz	0,25 - 0,35	0,2 - 0,3	1,25 - 1,35
Frijol	0,4 - 0,6	0,3 - 0,5	1,2 - 1,3
Trigo	0,03 - 0,05	0,02 - 0,04	1,3 - 1,4

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3. 2. DETERMINACIÓN DEL MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN

3. 2. 1. Selección de materiales para la construcción del equipo

La selección de materiales para este proyecto se basó de acuerdo a los cálculos de fuerza de impacto, revisión de proyectos, facilidad de compra en el mercado y así como sugerencia de técnicos dedicado en la construcción de equipos.

Tabla III-2

Materiales empleados en la construcción del equipo

Parte del equipo	Material seleccionado	Justificación
Tolva	ASTM 131	El acero estructural de embarcaciones tiene buena resistencia ante el desgaste y atmosferas agresivas.
Cámara de Molienda	ASTM 131	Tiene buenas propiedades de dureza y resistencia y mayor comportamiento ante la corrosión, en comparación con el acero común.

Martillos	AISI 1018	Alta resistencia a la compresión, Al ser templado este aumenta su resistencia
Tamiz / Zaranda	Inox 304 2B	ideal para tamices por su resistencia a la corrosión, su dureza, también ofrece rigidez y precisión ante el trabajo bajo laser
Eje.	SAE 1045	Buena resistencia a la torsión y accesibilidad ante la compra.
Soporte rotor de martillos	Hierro	Económico, no se requiere elevadas propiedades mecánicas.
Polea	Acero fundido galvanizado	Resistencia a la corrosión, bajo peso y con doble canal, con el fin de que la transmisión de potencia sea más eficaz
Correa trapezoidal de transmisión	Caucho / Polímero	Las correas trapezoidales se utilizan para transmitir potencia mecánica y son las correas más comunes.
Estructura	ANG DUAL ASTM A36	Comúnmente conocido como hierro angular, es económico y no requiere elevadas propiedades mecánicas.
Rueda	Hierro / Caucho Sintético	La rueda loca, ayudara en el transporte del equipo, cuenta con frenos de seguridad.
Tapa	Metacrilato PMMA	La Lamina acrílica es un material resistente y transparente, ideal para observar el flujo de entrada.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3. 2. 2. Selección del sistema eléctrico

El sistema eléctrico al igual que el motor consta de las siguientes partes.

Tabla III-3*Equipo y materiales para el sistema eléctrico*

Descripción	Función
Interruptor termomagnético sica c32	Tiene la función de encender y apagar el molino, también ofrece protección contra sobrecargar y cortocircuitos gracias a su desconexión automática.
Cable cilíndrico 2	Permite resistencia a elevadas tensiones eléctricas, así como protección gracias a su recubrimiento de PVC.
Motor WEG 3 HP	Brinda la energía cinética necesaria para la molienda, siendo una marca confiable y su funcionamiento comprobado.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3. 3. DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO**3. 3. 1. Cálculo de potencia necesaria para la molienda****3. 3. 1. 1. *Determinación de la potencia con el método de bond***

Para ello aplicamos la ley propuesta por bond, y esta es:

$$\frac{P}{\dot{m}} = 0,3162 * W_i * \left(\frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right) \quad (17)$$

Donde:

P: Potencia de molino (kW).*m*: Flujo másico (lb/h)*W_i*: Índice de trabajo relacionado (Kw.h/ton).*D_{pa}*: Apertura al 50 % y Diámetro de la alimentación (mm).*D_{pb}*: Diámetro del producto de salida. (mm).

Datos:

$$P = ? \text{ (kW)}$$

$$Wi = 6,73 \text{ (kW.h/t)}$$

$$Dpa = 16 \text{ (mm)}$$

$$Dpb = 0,5 \text{ (mm)}$$

$$\dot{m} = 24,187 \text{ kg/h} = 53,332 \text{ lb/h (dato de tamiz 1 de la Tabla III-7)}$$

2000 = factor de conversión de toneladas a lb.

$$p = \frac{53,332 * 0,3162 * 6,73}{2000} x \left(\frac{1}{\sqrt{0,1}} - \frac{1}{\sqrt{16}} \right)$$

$$P = 0,1652 \text{ kW} * \frac{1 \text{ HP}}{0,7457 \text{ kW}}$$

$$P = \mathbf{0,221 \text{ HP}}$$

Se realizó los mismos cálculos con diferente apertura de tamiz y flujo másico de la **Tabla III-7**, donde se obtuvo la siguiente tabla.

Tabla III-4

Potencia necesaria para la molienda

N°	Potencia (HP)
Tamiz 1 mm	0,221
Tamiz 2 mm	0,182
Tamiz 3 mm	0,174
Total	0,577

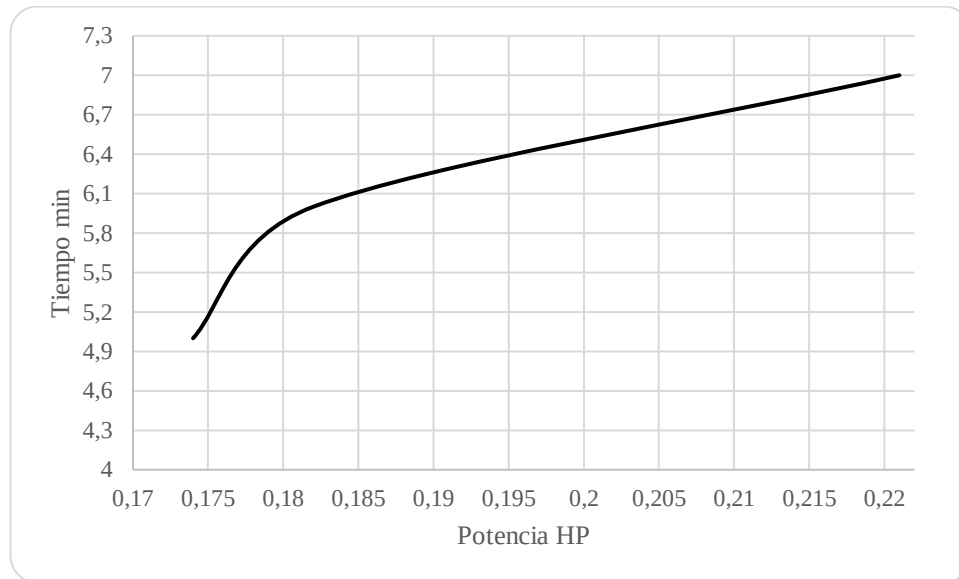
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para comprender mejor cómo evoluciona la potencia a lo largo del tiempo de funcionamiento, se realizó un análisis de regresión lineal. Esta técnica estadística nos permite modelar la relación entre estas dos variables y, a partir de ella, predecir el valor de la potencia en cualquier momento dado. De esta manera, podemos identificar

tendencias, estimar el consumo energético a largo plazo y tomar decisiones más informadas sobre el mantenimiento o reemplazo del equipo.

Figura 3-1

Relación Potencia (P) vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia, 2024.

De la gráfica se obtuvo la siguiente ecuación lineal y el Factor de correlación.

$$y = 37,164x - 1,1479 \quad (18)$$

$$r = 0,87$$

Nuestro factor de correlación es alto, debido a que se encuentra entre el rango 0,7 a 1. Esto significa que las variables aumentan o disminuyen juntas de forma proporcional. En resumen, este análisis muestra que existe una fuerte correlación positiva entre el tiempo de funcionamiento de nuestro molino de martillos y el consumo de energía. Esto sugiere que a medida que el molino trabaja por períodos más prolongados, su consumo de energía tiende a aumentar de manera considerable.

3. 3. 1. 2. *Factor de seguridad*

El factor de seguridad utilizado en estructuras estáticas o en componentes de máquinas sometidos a cargas dinámicas de desgaste, con movimiento y combinación de cargas, de propiedades del material de construcción según el análisis realizado por (Bermeo, 2014, p. 55). Donde los esfuerzos o el entorno, varía entre 2.5 y 4. Para este diseño específico, recomienda un factor de seguridad mínimo de 3.

Por lo tanto, tomando datos del material de construcción proporcionados por el fabricante, la carga de rotura máxima es de 520 MPa, Por lo tanto, tomando sugerencia del estudio donde el eje tenga una rotura media de 150 MPa. Hallamos nuestro factor de seguridad.

$$FS = \frac{\sigma \text{ tension o resistencia del material (MPa)}}{\sigma \text{ tension inducido o admisible del material (MPa)}} \quad (19)$$

Donde:

FS: factor de seguridad

σ : *tensión o resistencia del material. (MPa)*

σ : *tensión inducido o admisible del material (MPa)*

$$FS = \frac{520 \text{ MPa}}{150 \text{ MPa}}$$

$$FS = 3,47$$

El factor de seguridad de 3,47 indica que el molino tiene 3,47 veces la resistencia necesaria para soportar las cargas esperadas, garantizando alta seguridad y durabilidad. Este margen reduce el riesgo de falla y asegura un diseño confiable.

3. 3. 1. 3. *Corrección de la potencia de molienda*

La determinación de la potencia eléctrica del motor se realizó considerando el comportamiento del molino en los diferentes ensayos, analizando la demanda de potencia en función del tiempo y el consumo energético total. Para ello, se calculó la energía consumida en cada ensayo con la siguiente ecuación:

$$E = P * t$$

Donde:

E : es la energía consumida en cada ensayo (kWh).

P : es la potencia utilizada en el ensayo (kW).

t : es el tiempo de operación del ensayo (h).

Los valores experimentales obtenidos fueron los siguientes:

Tamiz	Potencia (HP)	Potencia (kW)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Energía (kWh)
1 mm	0.211 HP	0.157 kW	7 min	0.1167 h	0.0183 kWh
2 mm	0.182 HP	0.136 kW	6 min	0.1000 h	0.0136 kWh
3 mm	0.174 HP	0.130 kW	5 min	0.0833 h	0.0108 kWh

Fuente: elaboración propia

El consumo energético total del molino durante los ensayos se obtuvo sumando la energía utilizada en cada prueba:

$$E = 0,0183 + 0,0136 + 0,0108 = 0,0427 \text{ kWh}$$

A partir del análisis de potencia, se identificó que el ensayo con mayor demanda de potencia corresponde al tamiz de 1 mm, con un valor de (0.211 HP).

Con este dato, se calculó la potencia eléctrica requerida para el motor, considerando la eficiencia del sistema y un factor de seguridad adecuado para garantizar un desempeño óptimo en el laboratorio.

Para determinar la potencia eléctrica del motor se utilizará la siguiente ecuación.

$$P_{Pelec} = \frac{P_{util}}{n_{elec} \times n_{mec}} * n_c \quad (20)$$

Donde:

P_{elec} : Potencia útil eléctrica del motor en HP O kW.

P_{util} : Potencia útil máxima registrada (HP)

n_{elec} : Eficiencia teórica eléctrica del motor asumida del 85%, 0,85.

n_{mec} : Eficiencia teórica mecánica asumida 80%, 0,8.

n_c : Coeficiente de seguridad, 3,46

El dato para la potencia máxima registrada lo obtenemos de la **Tabla III-4** entonces tenemos:

$$P_{Pelec} = \frac{0,211}{0,85 * 0,8} * 3,46$$

$$P_{Pelec} = 0,231 * 3,46 = 0,799kW = \mathbf{1,07 HP}$$

El resultado de 1.07 HP representa la potencia efectiva utilizada para moler 1 kg de muestra, considerando pérdidas por fricción, impacto y transmisión. Sin embargo, dado que el molino está diseñado para procesar hasta 5 kg, la demanda de potencia aumentará significativamente en carga máxima.

3. 3. 1. 4. *Cálculo de la potencia del motor sin carga*

La potencia del motor es un aspecto fundamental ya que este determinara la eficiencia del equipo. Para lo cual se debe tomar en cuenta todos los instrumentos que intervienen en el proceso de molienda para la determinación de la potencia mínima para el funcionamiento del equipo.

3. 3. 1. 5. *Factor dependiente de la velocidad de rotación*

Las velocidades de rotación que oscilan entre 30 y 40 m/s el factor dependiente es de 0.00022. (Bermeo, 2014, p. 79)

Ecuación: Potencia del motor sin carga.

$$P = \frac{w * r^2 * n^3 * e * f}{8 * 100000 * nm * nt} \quad (21)$$

Donde:

P = potencia del motor sin carga, en HP

w = peso de los martillos, en Kg

r = diámetro de rotación de martillo, en m.

e = número de matillos.

n = rpm del rotor.

f = factor dependiente de la velocidad de rotación de los martillos.

nt = rendimiento mecánico por transmisión. (85%)

nm = rendimiento del motor. (80%)

factores de conversión de unidades para HP = 8; 100000

$$P = \frac{0,839kg * 0,21^2m * 2870^3rpm * 8 * 0,00022}{8 * 100000 * 0,8 * 0,85}$$

$$P = 2,829 HP$$

3. 3. 1. 6. Cálculo de la potencia necesaria para la trituración

Para calcular la potencia necesaria de trituración para los granos secos se utiliza la ley de Rittinger. La constante de Rittinger para cereales es 0,25 (hp*h cm) / ton para el cálculo de esta expresión es necesario conocer la capacidad del equipo en ton/h cuyo valor lo obtenemos mediante conversión, la ley de Rittinger manifiesta la potencia requerida para la percusión de las partículas partiendo de su diámetro inicial y final.

$$P = c * k_R \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) \quad (22)$$

Donde:

P : potencia con carga (Hp)

c : capacidad del equipo (ton/h)

d_1 : diámetro de entrada de la muestra (cm)

d_2 : diámetro de salida (cm)

k_R : constante de Rittinger para cereales 0,25 (HP*h*cm) /Ton (Bermeo 2014, p. 81)

La capacidad del equipo ya obtenida más abajo el cual fue de 0,027 kg/s por lo que hacemos la conversión a t/h.

$$0,027 \frac{kg}{s} * \frac{1 t}{1000kg} * \frac{3600 s}{1h} = 0,09982 \frac{t}{h} = 0,1 t/h$$

$$p = 0,1 \frac{ton}{h} * 0,25 \frac{Hphcm}{ton} * \left(\frac{1}{0,1cm} - \frac{1}{0,7cm} \right)$$

$$p = 0,214 HP$$

3. 3. 1. 7. *Potencia total para el funcionamiento del molino con carga*

Esta potencia se obtiene, tras la sumatoria de la potencia del dispositivo con carga y sin carga.

$$Pt = p1 + p2 \quad (23)$$

Donde:

p_t : potencia total para el funcionamiento.

p_1 : potencia sin carga (HP)

p_2 : potencia con carga (HP)

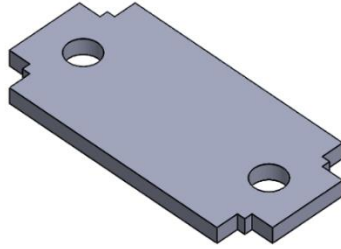
$$Pt = 2,829 + 0,214$$

$$Pt = 3,043HP = 3HP$$

3. 3. 2. *Determinación del número de martillos*

3. 3. 2. 1. *Cálculo de la masa de los martillos*

Los martillos empleados tendrán las siguientes dimensiones, de acuerdo con la figura que muestra:

Figura 3-2*Ilustración digital del martillo*

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Datos:

 e_m = espesor del martillo: 0,4 cm h_m = altura del martillo: 9,0 cm l_m = longitud del martillo: 4,0 cm d_m = diámetro de abertura del martillo: 1,0 cm

Considerando estos parámetros determinamos el volumen total del martillo.

$$V_{total} = V_{martillo} - V_{abertura} \quad (24)$$

Volumen del martillo sin abertura:

$$V_{martillo} = e_m * h_m * l_m \quad (25)$$

$$V_{martillo} = 0,4 \text{ cm} * 9,0 \text{ cm} * 4,0 \text{ cm}$$

$$V_{martillo} = 14,4 \text{ cm}^3$$

Volumen de abertura:

$$V_{abertura} = \pi * e * \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (26)$$

$$V_{abertura} = 0,314 \text{ cm}^3 * 2$$

$$V_{abertura} = 0,628 \text{ cm}^3$$

Volumen total del martillo:

$$V_{total} = V_{martillo} - V_{abertura}$$

$$V_{total} = 14,4 \text{ cm}^3 - 0,628 \text{ cm}^3$$

$$V_{total} = 13,772 \text{ cm}^3$$

El material adecuado para los martillos de un molino de este tipo es acero SAE AISI 1018 por su gran resistencia al impacto y resistencia a la abrasividad, y conociendo su densidad podremos determinar la masa de cada martillo de la siguiente manera:

$$\text{Densidad del acero} = 7,87 \text{ g/cm}^3$$

$$m_{martillo} = V_{martillo} * \rho_{martillo} \quad (27)$$

$$m_{martillo} = 14,08 \text{ cm}^3 * 7,87 \text{ g/cm}^3$$

$$m_{martillo} = 110,86 \text{ gr} = \mathbf{0,1108Kg}$$

3. 3. 2. 2. *Cálculo de la velocidad tangencial de los martillos*

$$w = r_m * \omega_m \quad (28)$$

Donde:

w = velocidad tangencial del molino (m/s)

r_m = radio entre la punta del martillo y el centro del eje del martillo. (m).

ω_m = velocidad angular de los martillos (rad/s)

Para el dato del rpm se usó las que nos brinda el motor eléctrico. El cual es de 2870 rpm. Es decir, la velocidad final con la que gira el molino es la misma, debido a que las poleas tienen el mismo diámetro.

Hallamos la velocidad angular.

$$\omega = \frac{2870 \text{ rev}}{1 \text{ min}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 300,54 \text{ rad/s}$$

Con el dato de velocidad angular, la velocidad tangencial será.

$$w = 0,105 \text{ m} * 300,54 \text{ rad/s}$$

$$w = 31,55 \text{ m/s}$$

3. 3. 2. 3. Cálculo del factor f

Tabla III-5

Valores del factor f a diferentes velocidades tangenciales

Velocidad tangencial	Factor “ f ”
m/s	
17	0,0220
20	0,0160
23	0,0100
26	0,0080
30	0,0030
40	0,0015

Fuente: (Duda H. W., pág. 45)

Si bien se tiene una velocidad tangencial del 31,55 m/s. Por interpolación se obtiene el valor de f , el cual es de. $f = 0,00276$

3. 3. 2. 4. Cálculo del número de martillos

$$P_{motor} = \frac{G * r^2 * n^3 * e * f}{8 * 100000 * nm} \quad (29)$$

Donde:

G = peso del martillo (kg)

r = radio que describe el martillo en el molino en (m).

n = número de vueltas por minuto del rotor.

e = número de martillos.

f = factor dependiente de velocidad de rotación de los martillos, según tabla.

η_m = eficiencia mecánica del motor. Asumida (viendo los resultados de las potencias un 80%, 0,8)

despejando e , tenemos.

$$e = \frac{N * 8 * 100000 * \eta_m}{G * r^2 * n^3 * f}$$

$$e = \frac{1 * 8 * 100000 * 0,8}{0,1108 * 0,108^2 * 2780^3 * 0,00276}$$

$$e = 8,35$$

Número de Martillos: **8 martillos.**

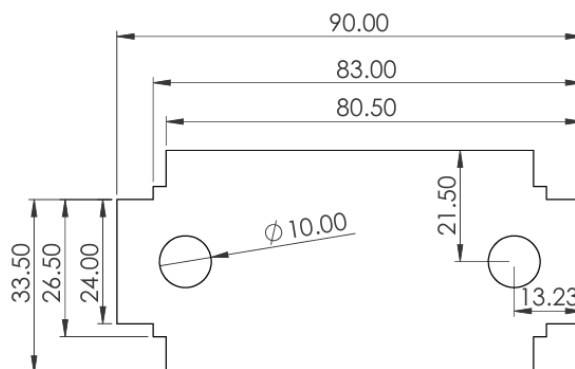
En este caso el número ideal de martillos serían 8 martillos. Si bien se podría aumentar a 9, pero quedaría impar en cada tren. Un lado del eje cargaría más martillos.

3.3.2.5. *Diseño de los martillos*

El material de percusión es el que se encarga de reducir el tamaño de los granos mediante golpes mecánicos repetitivos. Este componente se encuentra dentro de la cámara de molienda, y está fabricado en acero AISI 1018, el cual ha sido templado para incrementar su dureza.

Figura 3-3

Diseño de los martillos



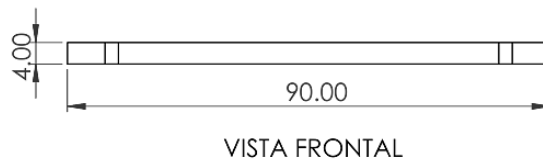
Fuente: Elaboración propia, 2024.

3. 3. 2. 6. *Determinación de área de impacto del martillo*

Dado que la forma del martillo es aproximadamente rectangular, se ha estimado que el área de impacto corresponde a la mitad de su longitud. Esta simplificación asume una distribución uniforme de la fuerza a lo largo de la superficie de contacto, lo cual permite realizar un cálculo rápido y obtener una aproximación razonable del esfuerzo al que estará sometida esta área. Este enfoque resulta útil para obtener una estimación inicial y realizar cálculos preliminares.

Figura 3-4

Área de impacto del martillo



Fuente: Elaboración propia, 2024.

$$h = 4,5 \text{ mm}$$

$$e = 4 \text{ mm}$$

$$A = h * e^2 \quad (30)$$

$$A = 4,5mm * 4mm^2$$

$$A = 72 \text{ mm}^2$$

3. 3. 2. 7. *Determinación del coeficiente de seguridad del martillo*

Datos:

Masa del martillo: 0,1108 kg

Distancia radial: 0,105 m.

Velocidad de rotación: 2870 RPM (equivalente a 300,56 rad/s).

Limite elástico del acero AISI 1018 templado: 400MPa

Área expuesta: 72 mm²

Al agregar el límite elástico de 400 MPa al cálculo, dato brindado en las propiedades técnicas del fabricante, se está verificando que la tensión máxima a la que estará sometido el martillo sea significativamente menor que la tensión que causaría una falla. Esto garantiza que el martillo sea capaz de soportar las cargas a las que estará expuesto durante su vida útil.

Cálculo de la fuerza centrífuga:

$$F_c = m * r * \omega^2 \quad (31)$$

$$F_c = 1050,87 \text{ N}$$

Esfuerzo aplicado en el área de impacto:

$$\sigma_{aplicado} = \frac{F_c}{area} \quad (32)$$

$$\sigma_{aplicado} = \frac{1050,87}{72} = 14,60 \text{ MPa}$$

Cálculo del coeficiente de seguridad (FS):

$$FS = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{aplicado}} \quad (33)$$

$$FS = \frac{400}{14,60} = 27,41$$

El coeficiente de seguridad de aproximadamente 27.41, por tanto, el martillo con el acero AISI 1018 templado ofrece un margen de seguridad adecuado para resistir la fuerza centrífuga durante la operación del molino.

3. 3. 2. 8. Longitud de los martillos

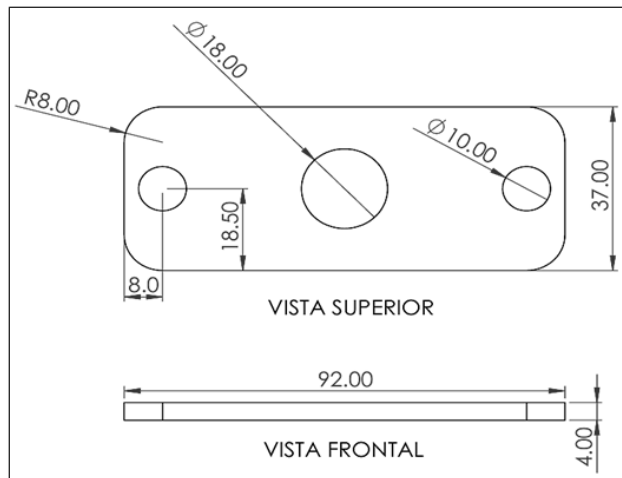
Según los fabricantes (Ovalle & Duarte, 2012, p. 51), el largo del martillo puede variar entre 70 y 100 mm, dependiendo del propósito del molino. Además, el espesor del martillo debe ser, como mínimo, la mitad del diámetro del grano de la materia prima seleccionada.

3.3.2.9. Soporte del rotor para los martillos.

Los soportes sujetos al eje central sirven para dar rotación a los martillos y alcanzar la velocidad necesaria para el fraccionamiento de los granos.

Figura 3-5

Soporte para martillos



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Ecuación: Calculo de la masa para los soportes o porta martillos.

$$m = v * d \quad (34)$$

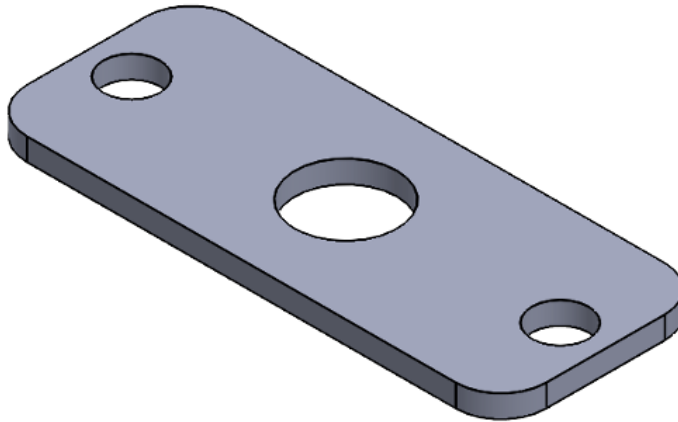
Donde:

m : masa del soporte (g).

v : volumen del soporte (cm^3)

d : densidad de la placa metálica, $7,80(\text{g}/\text{cm}^3)$

Calcular el volumen de la placa:

Figura 3-6*Soporte de martillos*

Fuente: Elaboración propia, 2024.

$$V_{\text{placa}} = \text{Largo} * \text{Ancho} * \text{Espesor} \quad (35)$$

$$V_{\text{placa}} = 92 \text{ mm} * 37 \text{ mm} * 4 \text{ mm} = 13616 \text{ mm}^3 / 1000$$

$$V_{\text{placa}} = 13,615 \text{ cm}^3$$

Calcular el volumen de los agujeros:

$$\text{Volumen de un cilindro} = \pi * r^2 * \text{altura} \quad (36)$$

$$\text{Volumen total de los agujeros} = 2 * \pi * (5 \text{ mm})^2 * 4 \text{ mm}$$

$$\text{Volumen total de los agujeros} = 2 * 314,15 \text{ mm} = 0,628 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen mayor} = \pi * (9 \text{ mm})^2 * 4 \text{ mm} = 1017,87 \text{ mm}^3 / 1000$$

$$\text{Volumen mayor} = 1,017 \text{ cm}^3$$

Calcular el volumen del material:

$$V_{\text{material}} = V_{\text{placa}} - V_{\text{agujeros}} \quad (37)$$

$$V_{\text{material}} = 13,615 \text{ cm}^3 - 1,645 \text{ cm}^3 = 11,97 \text{ cm}^3$$

Calcular la masa total:

$$m = v * d$$

$$m = 7.80 \frac{g}{cm^3} * 11,97 cm^3 = 93,366 g$$

$$m = 93,366 * 8 \text{ soportes: } \mathbf{746,92 g}$$

3. 3. 3. Cálculo de dimensiones del molino (carcasa)

3. 3. 3. 1. Capacidad del equipo de molienda

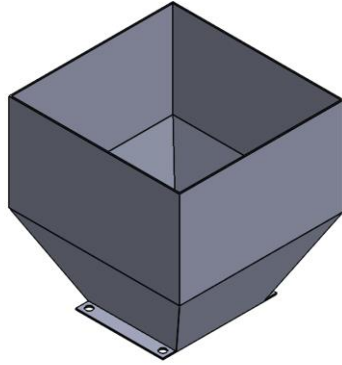
A partir de los datos experimentales obtenidos y tabulados en la **Tabla III-6**, se estimó una capacidad máxima de procesamiento de materia prima de 5 kg cada 3 minutos utilizando el tamiz de mayor apertura 3 mm. Esta tasa equivale a un caudal masico de 100 kg/h. Por lo que por conversión se obtiene los siguientes cálculos en kg/s.

$$\frac{100kg}{h} * \frac{1h}{3600s} = \mathbf{0,0278Kg/s}$$

3. 3. 3. 2. Cálculo del volumen útil para la tolva

Si bien existen dificultades para el cálculo exacto, debido a que hay que tomar en cuenta, el tamaño de cada grano, densidad y apilamiento se realizaron los cálculos aproximados en función al grano con mayor volumen.

Volumen de la tolva (Vt).

Figura 3-7*Ilustración de la tolva*

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Calculando volumen superior, cubo

$$V = A * B * C \quad (38)$$

Donde:

A: Altura (14 cm)

B: Largo (24 cm)

C: Ancho (23cm)

$$V = 14 \text{ cm} * 24 \text{ cm} * 23 \text{ cm}$$

$$V = 7728 \text{ cm}^3$$

Calculando volumen inferior, pirámide truncada

$$V = \frac{h}{3} (A_B + A_b * \sqrt{A_B * A_b}) \quad (39)$$

Donde:

h: altura (12cm)

 A_B : Área superior (552 cm²) A_b : Área inferior (144 cm²)

$$V = \frac{12cm}{3} (552cm^2 + 144cm^2 * \sqrt{552cm^2 * 144cm^2})$$

$$V = 3911 cm^3$$

Sumando los volúmenes se obtiene:

$$V_t = 11639 cm^3 \text{ o } 11,6 \text{ Litros}$$

El cálculo del volumen de la tolva arrojó un valor de 11639 cm³. Sin embargo, considerando las incertidumbres en las medidas, las simplificaciones geométricas realizadas y el factor de llenado, se considera que una aproximación a 10000 cm³ es más realista y conservadora. Esta aproximación permite tener en cuenta las variaciones propias del proceso de fabricación y garantizar un margen de seguridad en el cálculo de la capacidad de almacenamiento de la tolva.

Continuando con el cálculo del volumen útil. El Factor de Empacamiento para frijoles (Bermeo, 2014, p. 83): es 0,6 – 0,7

Volumen aproximado de la tolva según el diseño: 10000 cm³

Tenemos:

$$V_{util} = V_{total} * Factor \text{ de empacamiento} \quad (40)$$

$$V_{util} = 10000cm^3 * 0,65 \quad V = 6500cm^3 \text{ o } 6,5 \text{ L}$$

El volumen útil es de 6,5 L aproximadamente, lo cual representa más del 50% del volumen total, pero estos cálculos aproximados, dependen de otros factores mencionados anteriormente. Teniendo en cuenta, la capacidad de masa del proyecto, no se aleja mucho. Por lo que podemos deducir que el volumen del llenado puede ser el 50% de la tolva.

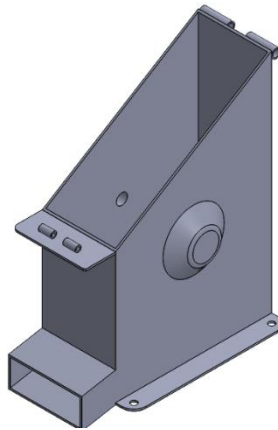
3. 3. 3. 3. Volumen de la cámara de molienda

El tamaño y forma de la cámara de molienda se determinan por las dimensiones de sus componentes internos y las tolerancias de seguridad necesarias. Los martillos, separadores y discos, junto con el espacio requerido para su movimiento, influyen directamente en el volumen total de la cámara. Según fabricantes como (SIRCA

Maquinaria Agroindustrial) una vez definido el radio de giro se considera tolerancias de seguridad de 1 cm entre la cámara y el implemento, también define el espesor de martillos que no debe ser menor a la mitad del diámetro del grano más grande, separadores no menores a 1,5 cm de ancho entre martillos y el ancho del soporte de martillo debe ser proporcional al de los martillos.

Figura 3-8

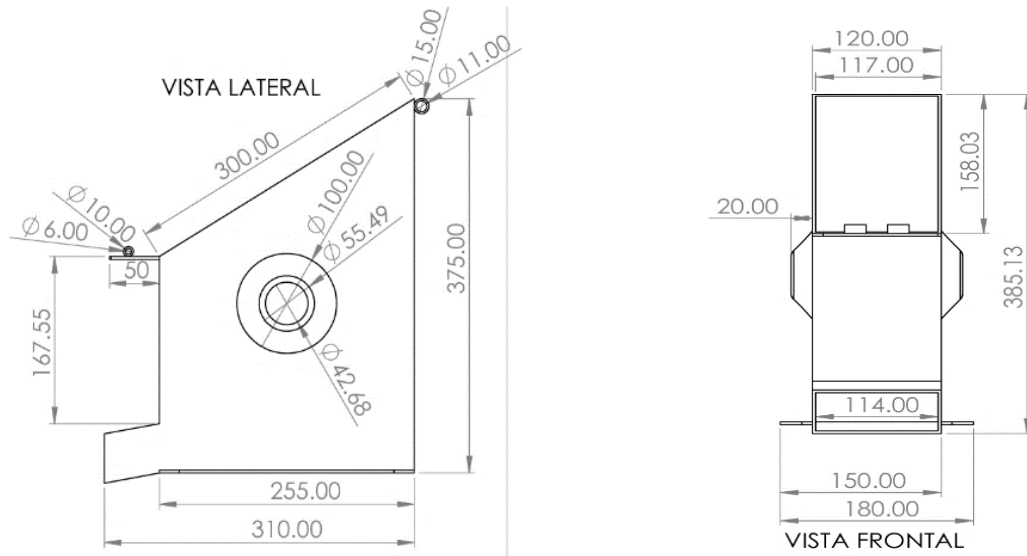
Cámara de molienda



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Cálculo del Volumen:

$$V_{prisma\ rectangular} = \text{Área de la base} * \text{Altura} \quad (41)$$

Figura 3-9*Cámara de molienda, vista lateral*

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Prisma Superior:

- Área de la base = $120 \text{ mm} * 20 \text{ mm} = 2400 \text{ mm}^2$
- Altura = 158.03 mm
- Volumen = $2400 \text{ mm}^2 * 158.03 \text{ mm} = 380472 \text{ mm}^3$

Prisma Inferior:

- Área de la base = $150 \text{ mm} * 255 \text{ mm} = 38250 \text{ mm}^2$
- Altura = 167.55 mm
- Volumen = $38250 \text{ mm}^2 * 167.55 \text{ mm} = 638774 \text{ mm}^3$

Volumen Total:

$$\text{Volumen}_{\text{total}} = \text{Volumen}_{\text{prisma superior}} + \text{Volumen}_{\text{prisma inferior}} \quad (42)$$

$$\text{Volumen}_{\text{total}} = 380472 \text{ mm}^3 + 638774 \text{ mm}^3 = 4443494 \text{ mm}^3$$

Convirtiendo a cm^3 :

$$\bullet 1 \text{ cm}^3 = 1000 \text{ mm}^3$$

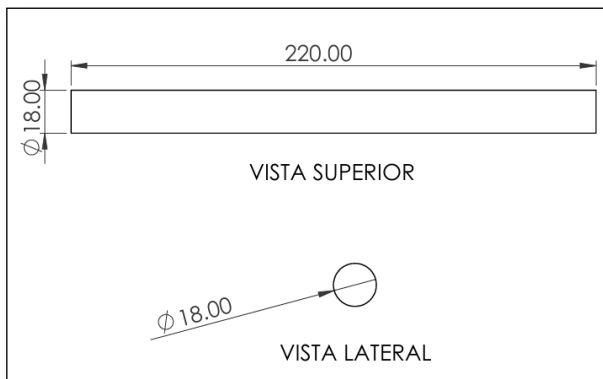
$$\text{Volumen}_{total} = 4443494 \text{ mm} * \frac{1 \text{ cm}^3}{1000 \text{ mm}} = 4443,49 \text{ cm}^3$$

3. 3. 3. 4. Eje principal

Una vez definida la velocidad de rotación en RPM, se procede a seleccionar ejes estandarizados disponibles en el mercado, asegurándose de que cumplan con el radio mínimo para tolerar dicha velocidad. Con esta base, se elige el diámetro del eje principal y su longitud, siguiendo las especificaciones determinadas en el cálculo del volumen de la cámara de molienda.

Figura 3-10

Eje principal.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Cálculo del radio del eje:

$$\text{radio}_{eje} = \text{Diámetro} / 2 \quad (43)$$

$$\text{radio}_{eje} = 18 \text{ mm} / 2 = 9 \text{ mm} = 0.9 \text{ cm}$$

Cálculo del volumen del eje:

$$\text{Volumen}_{eje} = \pi * r^2 * L \quad (44)$$

$$Volumen_{eje} = \pi * (0.9 \text{ cm})^2 * 22 \text{ cm} = 55.98 \text{ cm}^3$$

Cálculo de la masa:

Según la norma ASTM A 108, la densidad del acero SAE O AISI 1018, tiene una densidad de 7.80 g/cm³, entonces:

$$Masa = Densidad * Volumen \quad (45)$$

$$Masa = 7.80 \text{ g/cm}^3 * 55.98 \text{ cm}^3 = \mathbf{436.64 \text{ gr}}$$

Cálculo de las velocidades de rotación del molino

3. 3. 3. 5. Velocidad tangencial final

La velocidad final a la que muele un molino depende de varios factores, incluyendo el tipo y cantidad de material que se está procesando. La velocidad promedio y la variación en esa velocidad son importantes para determinar la fuerza necesaria para iniciar y mantener el proceso de molienda.

Los valores de Cs (coeficiente de fluctuación) para equipos de vibración y molienda es **0.02** (Pavón 2013, p. 38) y la velocidad tangencial hallada anteriormente por interpolación, el cual fue de **31,55 m/s**. realizamos los siguientes cálculos.

Ecuación: Calculo de la velocidad tangencial final.

$$Vc = -Vv * \frac{Cs - 2}{Cs + 2} \quad (46)$$

Donde:

Cs: coeficiente de fluctuación.

Vv: velocidad tangencial de los martillos sin carga.

Vc: velocidad tangencial de los martillos con carga.

$$Vc = -31,55 \frac{m}{s} * \frac{0,02 - 2}{0,02 + 2}$$

$$\mathbf{Vc = 30,92 \text{ m/s}}$$

3. 3. 3. 6. *Energía necesaria para el rompimiento de granos*

Una vez obtenidas las velocidades tangenciales necesarias para el rompimiento de los granos se procede al cálculo de la energía necesaria para la molienda de los granos en función de la capacidad del equipo.

Hallamos las velocidades tangenciales para cada grano. Para la aplicación de la expresión hallada se toma en consideración el grano de mayor peso con una altura de 0.45 m para el maíz, frijol y 0.15 m para trigo, en caso de trabajar con un dimensionamiento para granos de mayor masa y tamaño se deberá tomar este dato como referencia y hallar las variables mediante conversión. (Pavón, 2013, p. 38).

Ecuación: Calculo de la velocidad tangencial.

$$vt = \sqrt{\frac{mm * g * h}{mg}} \quad (47)$$

Donde:

mm: masa del martillo.

g: gravedad.

h: altura de caída libre.

mg: masa del grano.

Maíz:

$$vt = \sqrt{\frac{110,86gr * 9,8m/s^2 * 0,45m}{0,4 gr}}$$

$$vt = 34,96 m/s$$

Trigo:

$$vt = \sqrt{\frac{110,86gr * 9,8m/s^2 * 0,15m}{0,065 gr}}$$

$$vt = 27,65 \text{ m/s}$$

Frijol:

$$vt = \sqrt{\frac{110,86 \text{ gr} * 9,8 \text{ m/s}^2 * 0,45 \text{ m}}{0,5 \text{ gr}}}$$

$$vt = 31,26 \text{ m/s}$$

Una vez obtenido las velocidades tangenciales de cada grano, calculamos las energías necesarias para fracturar cada grano. Empleamos la siguiente ecuación.

Ecuación: Energía necesaria para romper un grano.

$$E = \left(\frac{mg * v^2}{2} \right) / mg \quad (48)$$

Donde:

E : energía (J)

mg : masa de grano (kg)

v : velocidad tangencial (m/s).

Maíz:

$$E = \left(\frac{4 \times 10^{-4} * \frac{34,96 \text{ m}}{\text{s}}}{2} \right) / 4 \times 10^{-4}$$

$$E = 611,10 \text{ J/kg}$$

Frijol:

$$E = \left(\frac{5 \times 10^{-4} * \frac{31,26 \text{ m}}{\text{s}}}{2} \right) / 5 \times 10^{-4}$$

$$E = 488,6 \text{ J/kg}$$

Trigo:

$$E = \left(\frac{1 \times 10^{-4} * \frac{27,65m}{s}}{2} \right) / 1 \times 10^{-4}$$

$$E = 366,93 \text{ J/kg}$$

3. 3. 3. 7. *Velocidad angular del rotor del molino*

El radio de giro es un aspecto fundamental para el diseño del molino ya que este determinara el tamaño mínimo de la cámara de molienda y este viene determina por la velocidad angular del rotor.

Ecuación: Calculo del radio de giro.

$$Wm = \frac{Vc * 60}{2\pi * rg} \quad (49)$$

Donde:

Vc: Velocidad tangencial final

Wm: velocidad angular de roto seleccionado.

rg: radio de giro.

$$rg = \frac{Vc * 60}{2\pi * Wm}$$

$$rg = \frac{30,92m/s * 60}{2\pi * 2870}$$

$$rg = 0,106 \text{ m} = 0,11\text{m}$$

Para la velocidad angular final, se relaciona la velocidad tangencial final y el radio de giro obtenido anteriormente. Entonces:

Ecuación: Calculo de la velocidad angular final.

$$Wf = \frac{vc}{rg} \quad (50)$$

Donde:

W_f : velocidad angular final.

v_c : velocidad tangencial final.

r_g : radio de giro.

$$W_f = \frac{30,92m/s}{0,11m}$$

$$W_f = 281 \frac{rad}{s}$$

Su equivalente en rpm es:

$$W_f = 2676 \text{ rpm}$$

3. 3. 3. 8. Cálculo de la fuerza centrífuga

La energía angular, compuesta por la energía de procesamiento y la de ruptura, es un parámetro fundamental para el cálculo de la potencia requerida por un equipo.

Ecuación: Calculo de la fuerza centrífuga

$$F_c = w_f^2 m_m * r_g \quad (51)$$

Donde:

W_f : Velocidad angular.

F_c : fuerza centrífuga.

m_m : masa del martillo.

r_g : radio de giro.

$$F_c = (281 \frac{rad}{s})^2 * 0,1108kg * 0,11m$$

$$F_c = 963,37 \text{ N}$$

3. 3. 3. 9. Relación de transmisión

La relación de transmisión es una herramienta fundamental en sistemas mecánicos que utilizan bandas para transmitir movimiento. Esta relación, determinada

por el diámetro de las poleas, nos permite multiplicar o dividir la velocidad de rotación inicial, proporcionada por el motor, para obtener la velocidad deseada en otro elemento del sistema.

Ecuación: Relación de transmisión.

$$Rt = velocidad \frac{mayor}{menor} \quad (52)$$

En el presente proyecto se requiere alcanzar una velocidad antes especificada de 2676 RPM por lo cual se adquirió un motor de 2870 RPM para desmultiplicar la velocidad de rotación del dispositivo la relación sería.

$$Rt = \frac{2870}{2676} rpm$$

$$Rt = 1,07$$

La relación de transmisión de 1,07, lo que representa el 7% de variación. Por lo que el diámetro de las poleas es irrelevante para el proyecto donde se justifica varios factores.

Primero, la velocidad de operación actual cumple con los requisitos de molienda, ya que el motor proporciona suficiente potencia sin necesidad de una mayor velocidad en el rotor. Segundo, esta configuración reduce el desgaste en los componentes internos del molino, como martillos y tamices, al evitar una aceleración innecesaria. Finalmente, como la relación de transmisión es casi 1:1 el tamaño y diámetro de las poleas pueden ser las mismas.

3. 3. 4. CÁLCULO DE LA MOLTURABILIDAD Y FLUJO MÁSIKO DEL MOLINO.

Molturabilidad y flujo másico:

La molturabilidad y el flujo másico no solo impactan la operación, sino también el diseño del equipo. Por ejemplo, el tamaño y diseño de los tamices, la potencia del motor y el diseño de los martillos deben adaptarse a las propiedades de los materiales a procesar para lograr un equilibrio óptimo entre productividad y eficiencia energética.

Existe una relación inversamente proporcional entre la molturabilidad y la energía requerida para la molienda. Cuando un material es más difícil de moler, el molino debe invertir más energía para alcanzar un tamaño de partícula deseado, lo que reduce el flujo másico debido al aumento en el tiempo de procesamiento.

Conforme a la definición la fórmula de la molturabilidad es la siguiente:

$$Mt = \frac{mp}{tm} * 60 \quad (53)$$

Donde:

Mt = Molturabilidad (Kg/min).

mp = masa de producto que pasa a través del tamiz designado (Kg).

tm = tiempo en que el producto pasa por el tamiz designado (min).

60 = Factor de conversión de min a horas.

Muy bien una vez establecido la fórmula de la molturabilidad se recolectaron datos durante la molienda, las cuales fueron tabuladas en la siguiente tabla.

Tabla III-6

Relación masa/tiempo que pasa por cada tamiz.

Tamiz/muestra	MASA QUE PASA POR CADA TAMIZ			TIEMPO
	1 mm	2 mm	3 mm	t (min)Total
Trigo (gr)	963,73	970,38	986,01	7
Maíz (gr)	923,8	967,85	975,45	6
Frijol (gr)	934,3	961,17	973,35	5
Total	2821,83	2899,4	2934,81	18

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En la tabla anterior se puede observar la cantidad de masa que pasa por cada tamiz en un tiempo determinado. Con estos datos procedemos a calcular el flujo másico o también llamado molturabilidad.

$$Mt = \frac{mp}{tm} * 60$$

$$Mt = \frac{2,82183 \text{ kg}}{7 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$$

$$\mathbf{Mt = 24,187 \text{ kg/h}}$$

Se tabulo estos cálculos para cada tamiz, los cuales se muestra en la siguiente tabla.

Tabla III-7

Flujo másico o capacidad de molienda del molino en 1 hora. (Kg/h)

Nº	Masa (kg)	$\dot{m} = mt$ (kg/h)
Tamiz 1 mm	2,82183	24,187
Tamiz 2 mm	2,8994	28,994
Tamiz 3 mm	2,93481	35,217

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3. 4. MUESTREO

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en los laboratorios de operaciones unitarias de la facultad de ingeniería química, utilizando tamices que cumplen con la norma UNE-EN ISO 3310. Con el fin de obtener resultados más precisos, se realizaron pruebas con diferentes tamices y muestras.

Para caracterizar los granos de manera precisa, es necesario realizar un muestreo estandarizado previo. La muestra destinada al análisis en laboratorio debe almacenarse en condiciones secas a temperatura ambiente, con una humedad relativa que no exceda el 13% para preservar sus propiedades originales.

3. 4. 1. Determinación de la humedad

Procedimiento para la determinación de humedad presente en la materia prima.

Tabla III-8*Procedimiento para la determinación de humedad*

Método	Materiales y equipos
PROPUESTO	❖ Balanza eléctrica. ❖ Termobalanza. ❖ Espátula de cuchara metálica.
Procedimiento	
- Se pesaron 5 gramos de cada muestra, previa estandarización, selección y limpieza. - Una vez pesada es introducida en la cámara de secado de la termobalanza, donde se corrobora el peso inicial de nuestra muestra. - Para la muestra que haya pasado la prueba de humedad posteriormente es sometida a un último pesaje. - Como último paso, se realiza una relación matemática donde se resta el peso inicial menos el peso final, sabiendo de esa manera la cantidad de humedad que tenía nuestra muestra.	

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Con la termobalanza del laboratorio de operaciones unitarias se determinó la masa inicial y final de una muestra de 5 gr, con los datos arrojados por el equipo se realizó el cálculo de la humedad de la muestra.

Maíz

$$\%_{humedad} = \left(\frac{mi - mf}{mi} \right) 100\%$$

$$\%_{humedad} = \left(\frac{5,035gr - 4,856gr}{5,035gr} \right) 100\%$$

$$\%_{humedad} = 3,56 \%$$

Trigo.

$$\%_{humedad} = \left(\frac{mi - mf}{mi} \right) 100\%$$

$$\%_{humedad} = \left(\frac{5,006gr - 4,782gr}{5,006gr} \right) 100\%$$

$$\%_{humedad} = 4,47 \%$$

Frijol.

$$\%_{humedad} = \left(\frac{mi - mf}{mi} \right) 100\%$$

$$\%_{humedad} = \left(\frac{5,010gr - 5,005gr}{5,010gr} \right) 100\%$$

$$\%_{humedad} = 0,1 \%$$

3. 4. 2. Eliminación de impurezas y preparación de la muestra.**Tabla III-9***Proceso de preparación de la muestra*

Método	Materiales y equipos
PROPUESTO	❖ Tamiz de 5 mm o >
	❖ Bolsas ziploc.
	❖ Balanza Analógica.

Procedimiento (Imágenes ANEXO 5**PRUEBA DE MOLIENDA CON LAS DIFERENTES MUESTRAS**

- ❖ Para la limpieza de las muestras, se realizó con la ayuda de un tamiz. Donde el tamiz se llenó en un 50 % de muestra, para después agitarlo manualmente.
- ❖ Se agito por un tiempo de 3 minutos, hasta que deje de caer partículas de piedra, pajas y otros.

-
- ❖ Como segundo mecanismo de separación, clasificación y limpieza, se realizó la inspección visual y manual de los granos.
 - ❖ Después de tener las muestras sin impurezas, se procedió a pesado y etiquetado, el pesado fue de 1 kilogramo de muestra.
-

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3. 4. 3. Prueba de molienda

Tabla III-10

Procedimiento de la molienda

Método	Materiales y equipos
PROPUESTO	❖ Tamiz de 3 mm, 2 mm y 1 mm.
	❖ Molino.
	❖ Bolsas ziploc de 18x27cm
	❖ Cepillo de limpieza.
	❖ Cronometro.

Procedimiento (Imágenes ANEXO 5

PRUEBA DE MOLIENDA CON LAS DIFERENTES MUESTRAS)

-
- ❖ Se revisa la cámara de molienda para asegurarse de que no haya objetos no deseados.
 - ❖ Se coloca la zaranda adecuada dentro de la cámara de molienda.
 - ❖ Se cierra la cámara de molienda y se ajusta con la perilla de seguridad.
 - ❖ Se verifica que el control de flujo de entrada a la cámara esté completamente cerrado.
 - ❖ Se vierte 1 kg de la muestra de granos en la tolva y se tapa.
 - ❖ Se asegura que el interruptor de encendido esté en posición de apagado y se conecta el molino a la corriente eléctrica.
 - ❖ Se adapta una bolsa Ziploc a la salida del molino.
 - ❖ Se enciende el molino.
 - ❖ Se abre el flujo de entrada al 50% y se inicia el cronometraje del tiempo de molienda.
 - ❖ Se apaga el molino una vez que la muestra molida deja de caer en la bolsa Ziploc.
 - ❖ Se desconecta el molino de la fuente eléctrica.
 - ❖ Se pesa el producto resultante de la molienda.
 - ❖ Se abre el molino y se limpia para la siguiente molienda.
-

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Datos obtenidos en la prueba de molienda

Tabla III-11

Resultados de la prueba de molienda

MASA QUE PASA POR CADA TAMIZ				TIEMPO
Tamiz/muestra	1 mm	2 mm	3 mm	t(min) Total
Trigo (gr)	963,73	970,38	986,01	7
Maíz (gr)	923,8	967,85	975,45	6
Frijol (gr)	934,3	961,17	973,35	5

MASA QUE PASA POR CADA TAMIZ				TIEMPO
Tamiz/muestra	1 mm	2 mm	3 mm	t(min) Total
Total	2821,83	2899,4	2934,81	18

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3. 4. 1. Balance de masa

El balance de masa es una técnica empleada para evaluar los flujos de entrada y salida en un proceso, ya sea físico o químico, con el objetivo de determinar la eficiencia del equipo y localizar posibles puntos de pérdida cuando el sistema no se encuentra en estado estacionario. En el caso de la molienda, al tratarse de un proceso físico que implica una única operación, el balance de masa se describe mediante la siguiente expresión.

$$E = S + P \quad (54)$$

Donde:

E: Flujo de entrada

S: Flujo de salida.

P: Perdidas o residuos.

Para realizar los cálculos de balance de masa se realizó una tabla donde se tabula las masas obtenidas durante los ensayos realizados con el equipo con diferencia de tamiz y muestra.

DATOS DE OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE MOLIENDA.

Tabla III-12

Resultados de la molienda

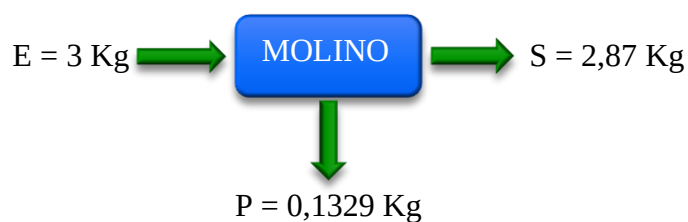
Criba	Maíz (g)	Frijol (g)	Trigo (g)
1 mm	923,8	934,3	963,73
2 mm	967,85	961,17	970,38

Criba	Maíz (g)	Frijol (g)	Trigo (g)
3 mm	975,45	973,35	986,01
masa total (Kg)	2,87	2,86	2,92
masa perdida (Kg)	0,1329	0,13118	0,07988

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Balance para el maíz:

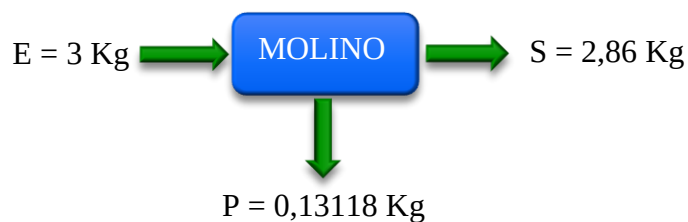
Cantidad de muestra empleada: 3 Kg



$$3 \text{ kg} = 2,87 \text{ Kg} + 0,1329 \text{ Kg}$$

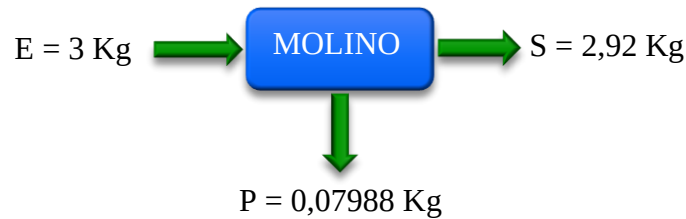
$$3 \text{ kg} = 3\text{kg}$$

Balance para el frijol:



$$3 \text{ kg} = 2,86 \text{ Kg} + 0,13118 \text{ Kg}$$

$$3 \text{ kg} = 3\text{kg}$$

Balance para el trigo:

$$3 \text{ kg} = 2,92 \text{ Kg} + 0,07988 \text{ Kg}$$

$$3 \text{ kg} = 3\text{kg}$$

3. 4. 2. Cálculo de la eficiencia

El cálculo de la eficiencia se basa en el balance de masa, ya que este es un indicador de los flujos o corrientes que intervienen en el proceso. Para evaluar la eficiencia de los molinos, al tratarse de operaciones físicas, se considera únicamente la productividad del equipo, definida como la relación entre la entrada, salida y residuos, y expresada en porcentaje. La expresión correspondiente es la siguiente:

Ecuación: Cálculo de la eficiencia.

$$n = \left(\frac{E - P}{E} \right) * 100\% \quad (55)$$

Donde:

E: flujo de entrada.

P: Perdidas.

n: Eficiencia.

Maíz:

$$n = \left(\frac{3\text{kg} - 0,1329\text{kg}}{3\text{kg}} \right) * 100\%$$

$$n = 95,57\%$$

Frijol:

$$n = \left(\frac{3kg - 0,13118kg}{3kg} \right) * 100\%$$

$$n = 95,62\%$$

Trigo:

$$n = \left(\frac{3kg - 0,07988kg}{3kg} \right) * 100\%$$

$$n = 97,33\%$$

Los datos obtenidos del balance de masa en el proceso de molienda del molino de martillos muestran eficiencias del 95% para maíz y frijol, y del 97% para trigo. Estos resultados evidencian la efectividad del molino en la reducción de tamaño de los granos, con pérdidas mínimas en el proceso. En cuanto a la eficiencia del 97% en la molienda del trigo, en comparación con el 95% del maíz y el frijol, se puede atribuir a varias razones. El trigo es más suave y menos fibroso, lo que facilita su reducción a partículas más finas.

3. 5. DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA MOLIENDA

3. 5. 1. Tamizado

El objetivo es clasificar las partículas por tamaño y evaluar la eficiencia de la molienda, identificando la distribución del material según los tamaños de los tamices. Esto permitirá determinar si el molino logró la reducción de tamaño deseada y optimizar el proceso de molienda si es necesario.

Método	Materiales y equipos
PROPUESTO	❖ Tamizadora. ❖ Balanza analógica. ❖ Bolsas ziploc.

Procedimiento (Imágenes pág.)

- ❖ Se pesaron todos los tamices que se utilizarían durante el ensayo para registrar su peso inicial.
- ❖ Se tomaron 100 gramos de cada una de las muestras ya molidas para el análisis.
- ❖ Se ordenó la tamizadora, ubicando los tamices de malla más grande en la parte superior y los más finos en la parte inferior.
- ❖ se vertió cada muestra de 100 gramos en la parte superior de la torre de tamices.
- ❖ La tamizadora se cerró y ajustó, configurando una intensidad de vibración de 3 y un tiempo de operación de 10 minutos.
- ❖ Se encendió la tamizadora y se dejó funcionando durante el tiempo programado.
- ❖ Una vez terminado el proceso de tamizado, se pesaron de nuevo cada uno de los tamices con cuidado, para registrar la cantidad de material retenido en cada uno.
- ❖ Este procedimiento se repitió para cada una de las 9 muestras.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3. 5. 2. Determinación de las fracciones de masas retenidas en los tamices en función del tiempo de molienda

Tabla III-13

Fracciones de masas retenidas y acumuladas para la malla 1 mm

N° MALLA	MALLA 1 mm								
	MAIZ %R	TRIGO %R	FRIJOL %R	MAIZ %R _A	TRIGO %R _A	FRIJOL %R _A	MAIZ %C _A	TRIGO %C _A	FRIJOL %C _A
0,063	5,7	17,4	33,3	5,7	17,4	33,3	94,3	82,6	66,7
0,25	24,4	32,3	20,3	30,1	49,7	53,7	69,9	50,3	46,3
0,5	66,1	39,9	29,7	90,5	72,2	50,0	9,5	27,8	50,0
1	3,1	3,3	4,3	69,2	43,2	34,0	30,8	56,8	66,0
2	0,0	0,0	0,0	3,1	3,3	4,3	96,9	96,7	95,7

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III-14*Fracciones de masas retenidas y acumuladas para la malla 2 mm*

MALLA 2 mm									
N° MALLA	MAIZ %R	TRIGO %R	FRIJOL %R	MAIZ %R _A	TRIGO %R _A	FRIJOL %R _A	MAIZ %C _A	TRIGO %C _A	FRIJOL %C _A
0,063	7,7	13,8	6,4	7,7	13,8	20,7	92,3	86,2	79,3
0,25	31,9	19,2	14,3	39,6	33,0	42,1	60,4	67,0	57,9
0,5	34,3	37,4	27,8	66,1	56,5	56,9	33,9	43,5	43,1
1	25,2	21,3	29,1	59,5	58,6	29,4	40,5	41,4	70,6
2	0,2	0,6	0,3	25,4	21,9	0,3	74,6	78,1	99,7
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III-15*Fracciones de masas retenidas y acumuladas para la malla 3 mm*

MALLA 3 mm									
N° MALLA	MAIZ %R	TRIGO %R	FRIJOL %R	MAIZ %R _A	TRIGO %R _A	FRIJOL %R _A	MAIZ %C _A	TRIGO %C _A	FRIJOL %C _A
0,063	7,4	3,2	12,7	7,4	3,2	12,7	92,6	96,8	87,3
0,25	24,7	7,5	10,9	32,1	10,6	23,6	67,9	89,4	76,4
0,5	26,8	21,9	20,5	51,5	29,4	31,4	48,5	70,6	68,6
1	39,1	59,5	48,6	65,9	81,4	69,1	34,1	18,6	30,9
2	0,3	0,3	0,5	39,4	59,8	49,1	60,6	40,2	50,9
4	0,0	0,6	0,6	0,0	0,6	0,6	100,0	99,4	99,4

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Distribución de partículas retenidas (%R):

Para calcular el porcentaje de rechazo se utilizó la siguiente ecuación.

$$\%R = \frac{\text{Peso retenido (g)}}{\text{Peso total de la muestra (g)}} \times 100 \quad (56)$$

En general, para la malla de 1 mm, los valores de %R son más altos en comparación con las mallas de mayor tamaño (2 mm y 4 mm), indicando que la mayor parte de las partículas se han reducido a un tamaño fino.

Para la malla de 2 mm, el porcentaje retenido muestra una mezcla de tamaños intermedios, con algunos materiales retenidos y otros que pasan a través de esta malla.

En la malla de 4 mm, la cantidad de material retenido es menor, indicando que las partículas que alcanzaron este tamiz son más grandes o que esta malla permite el paso de partículas más finas de forma más eficiente.

Porcentaje retenido acumulado (%Ra):

$$\%R_A = \%R_{An-1} + \%R \quad (57)$$

Para calcular el porcentaje de retenido acumulado se utilizó la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; los valores de %Ra y en cada caso, incrementan progresivamente desde los tamices más finos a los más gruesos, lo cual es normal en el análisis granulométrico, reflejando que las partículas más grandes quedan retenidas en los tamices superiores.

Porcentaje acumulado pasante (%Ca):

La Proporción pasante de masa, se observa que el %Ca en cada tabla, vemos una disminución progresiva, lo cual muestra que cada tamiz retiene una fracción específica del material y que, en general, el material molido tiene una distribución de tamaños más fina a medida que avanza en la torre de tamices.

$$\%C = 100 - \%R_A \quad (58)$$

Otras observaciones Específicas:

Maíz: En cada malla, los valores de %R, %Ra y %Ca del maíz muestran una mayor retención en los tamices de tamaño más fino. Esto indica que el maíz tiene una buena proporción de partículas finas.

Trigo: Los valores para el trigo sugieren una distribución más uniforme en comparación con el maíz, ya que no se concentra tanto en una sola fracción de tamaño.

Frijol: Similar al trigo, el frijol tiene una distribución más amplia, pero su retención en cada tamiz parece algo más concentrada en tamaños específicos según cada malla.

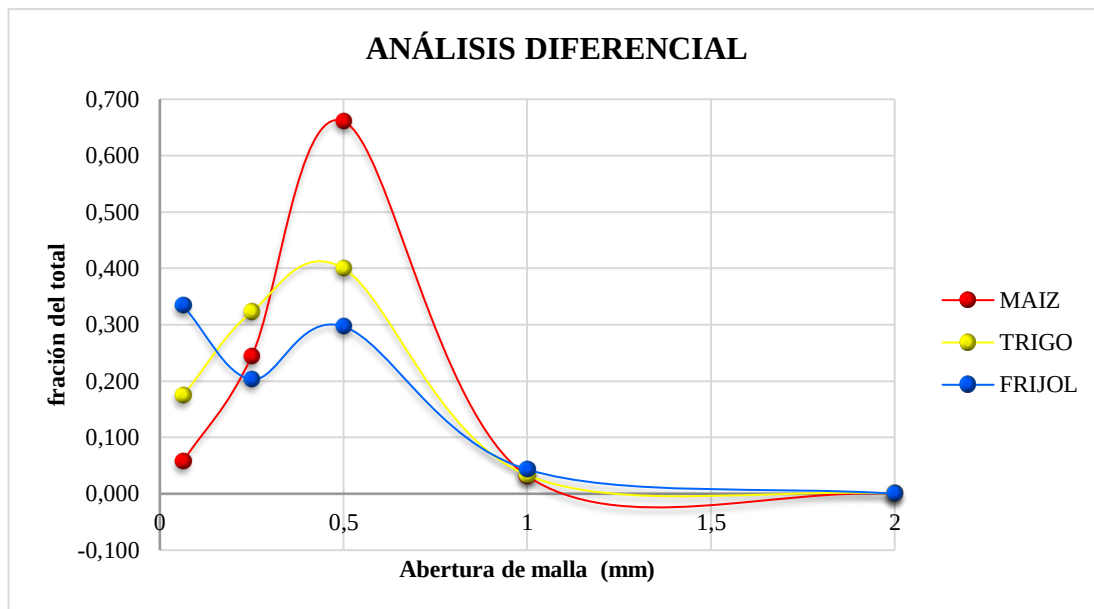
3. 5. 3. Análisis diferencial y análisis acumulativo

Tabla III-16

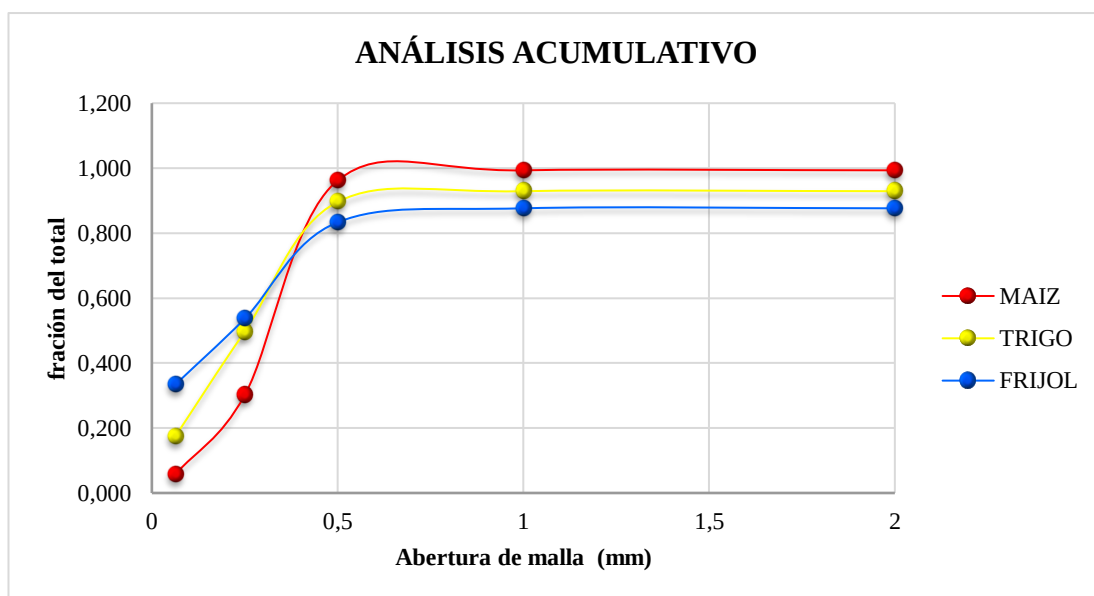
Cálculo de fracciones (X_i , Y_i) para el análisis granulométrico malla 1 mm

MALLA 1 mm	MAIZ					TRIGO					FRIJOL				
Abertura de malla D	Masa retenida (% peso)	X_i	Y_i	$X_i D_i$	X_i/D_i	Masa retenida (% peso)	X_i	Y_i	$X_i D_i$	X_i/D_i	Masa retenida (% peso)	X_i	Y_i	$X_i D_i$	X_i/D_i
0,063	5,7	0,057	0,057	0,004	0,908	17,4	0,174	0,174	0,011	2,761	33,3	0,333	0,333	0,021	5,294
0,25	24,4	0,244	0,301	0,061	0,976	32,3	0,323	0,497	0,081	1,291	20,3	0,203	0,537	0,051	0,812
0,5	66,1	0,661	0,962	0,330	1,321	39,9	0,399	0,896	0,200	0,799	29,7	0,297	0,833	0,148	0,593
1	3,1	0,031	0,993	0,031	0,031	3,3	0,033	0,929	0,033	0,033	4,3	0,043	0,876	0,043	0,043
2	0,0	0,0	0,993	0,0	0,0	0,0	0,0	0,929	0,0	0,0	0,0	0,0	0,876	0,0	0,0
SUMA				0,426	3,237				0,324	4,884				0,263	6,742

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 3-11*Análisis diferencial para malla 1 mm*

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 3-12*Análisis acumulativo para malla 1 mm*

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III-17

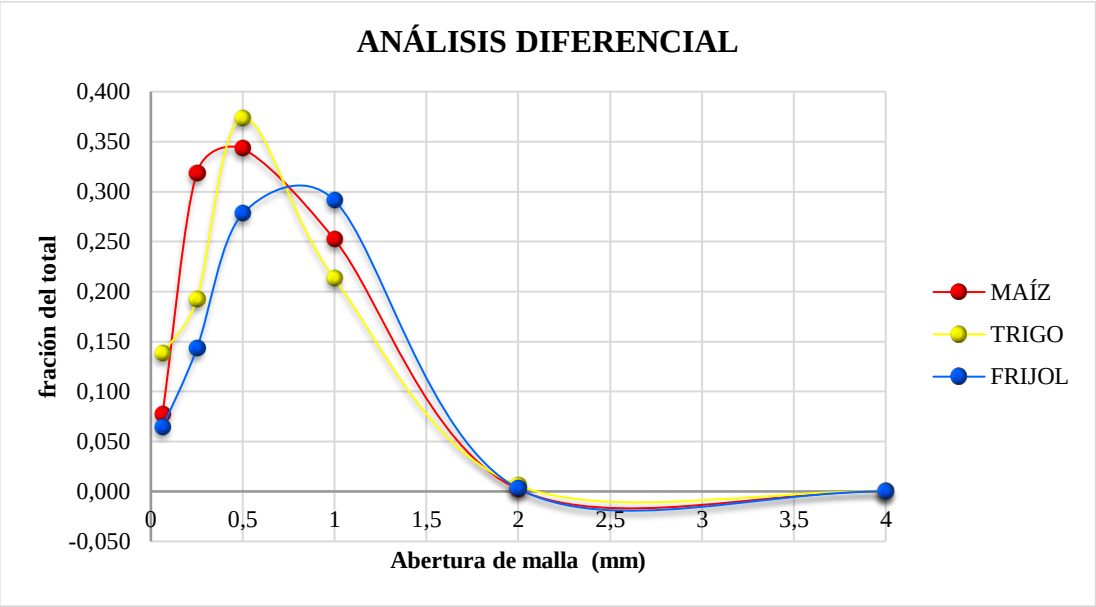
Cálculo de fracciones (Xi, Yi) para el análisis granulométrico malla 2 mm

MALLA 2 mm	MAÍZ					TRIGO					FRIJOL				
Abertura de malla D	Masa retenida (% peso)	Xi	Yi	XiDi	Xi/Di	Masa retenida (% peso)	Xi	Yi	XiDi	Xi/Di	Masa retenida (% peso)	Xi	Yi	XiDi	Xi/Di
0,063	7,7	0,077	0,077	0,005	1,222	13,8	0,138	0,138	0,009	2,188	6,4	0,064	0,064	0,004	1,013
0,25	31,9	0,319	0,396	0,080	1,274	19,2	0,192	0,330	0,048	0,767	14,3	0,143	0,207	0,036	0,571
0,5	34,3	0,343	0,738	0,171	0,686	37,4	0,374	0,703	0,187	0,747	27,8	0,278	0,485	0,139	0,556
1	25,2	0,252	0,991	0,252	0,252	21,3	0,213	0,916	0,213	0,213	29,1	0,291	0,776	0,291	0,291
2	0,2	0,002	0,993	0,004	0,001	0,6	0,006	0,922	0,012	0,003	0,3	0,003	0,778	0,006	0,001
4	0,0	0,0	0,993	0,0	0,0	0,0	0,0	0,922	0,0	0,0	0,0	0,0	0,778	0,0	0,0
SUMA				0,512	3,435				0,468	3,919				0,475	2,433

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 3-13

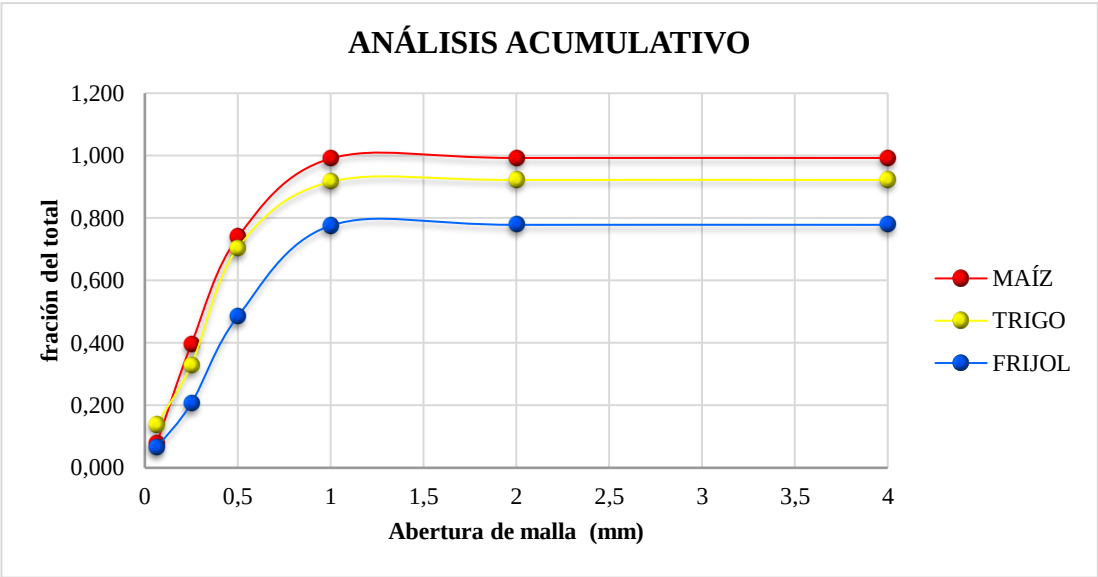
Análisis diferencial para malla 2 mm



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 3-14

Análisis acumulativo para malla 2 mm



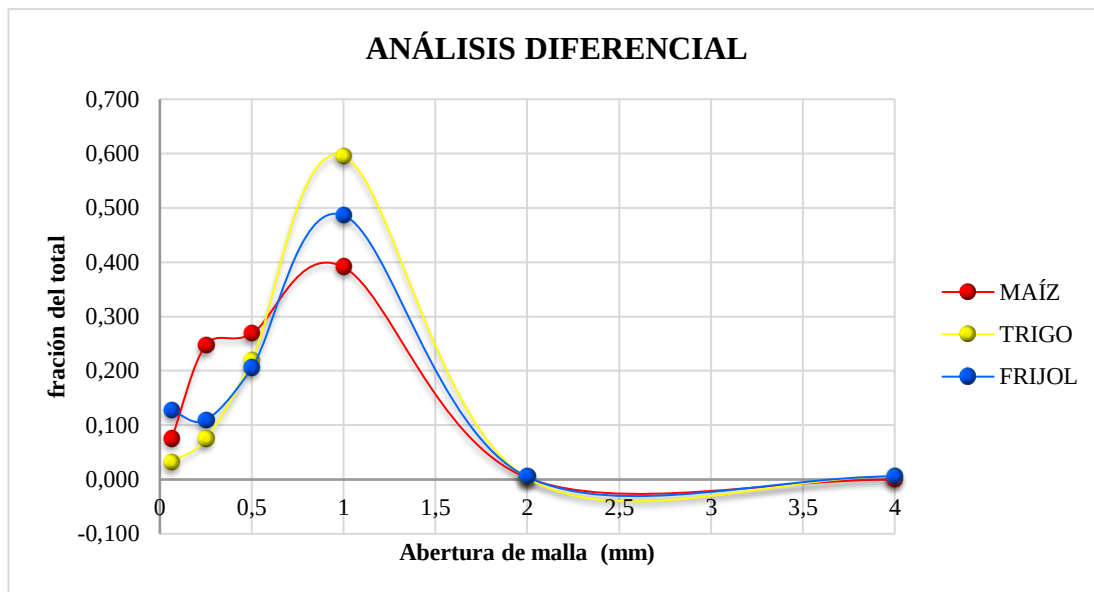
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III-18

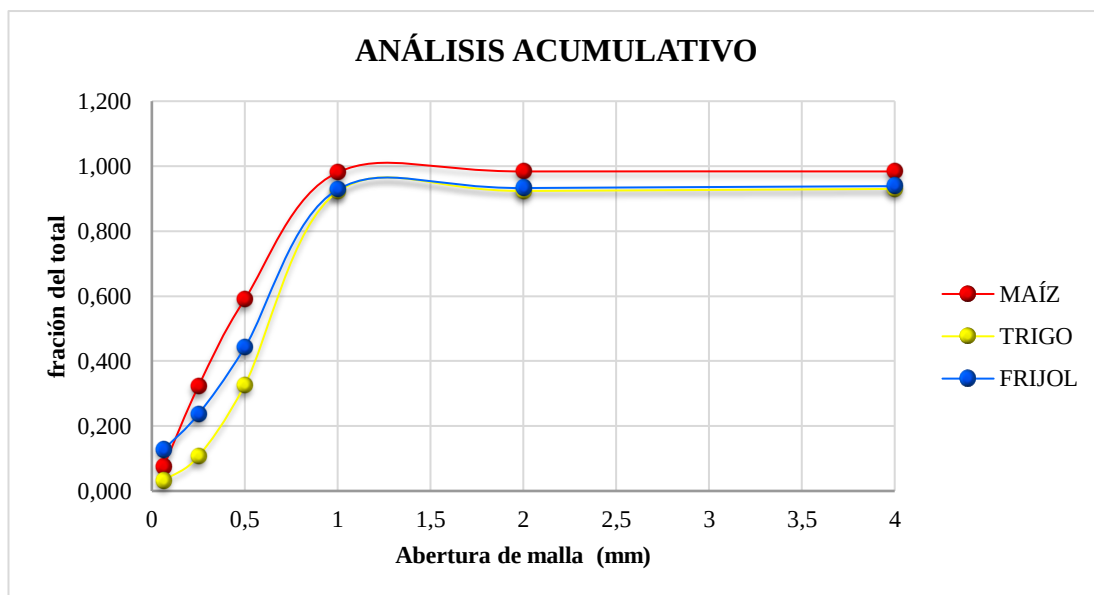
Cálculo de fracciones (Xi, Yi) para el análisis granulométrico malla 3 mm

MALLA 3 mm	MAÍZ						TRIGO					FRIJOL				
	Abertura de malla D	Masa retenida (% peso)	Xi	Yi	XiDi	Xi/Di	Masa retenida (% peso)	Xi	Yi	XiDi	Xi/Di	Masa retenida (% peso)	Xi	Yi	XiDi	Xi/Di
	0,063	7,4	0,074	0,074	0,005	1,182	3,2	0,032	0,032	0,002	0,506	12,7	0,127	0,127	0,008	2,015
	0,25	24,7	0,247	0,321	0,062	0,988	7,5	0,075	0,106	0,019	0,298	10,9	0,109	0,236	0,027	0,438
	0,5	26,8	0,268	0,590	0,134	0,537	21,9	0,219	0,326	0,110	0,439	20,5	0,205	0,441	0,103	0,410
	1	39,1	0,391	0,981	0,391	0,391	59,5	0,595	0,921	0,595	0,595	48,6	0,486	0,928	0,486	0,486
	2	0,3	0,003	0,984	0,006	0,002	0,3	0,003	0,924	0,005	0,001	0,5	0,005	0,933	0,010	0,002
	4	0,0	0,0	0,984	0,0	0,0	0,6	0,006	0,930	0,025	0,002	0,6	0,006	0,938	0,023	0,001
	SUMA				0,598	3,099				0,756	1,841				0,657	3,353

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 3-15*Análisis diferencial para malla 3 mm*

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 3-16*Análisis acumulativo para malla 3 mm*

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En las gráficas se observa que la mayor parte de las partículas se quedan retenidas en las mallas de menor tamaño, lo que indica una molienda eficiente. En la malla de 1 mm, el porcentaje retenido (%R) fue más alto en comparación con las mallas de 2 mm y 3 mm, reflejando la reducción efectiva de partículas a un tamaño fino.

Por otro lado, el porcentaje retenido acumulado (%Ra) aumentó progresivamente en cada malla, confirmando que las partículas más grandes permanecen en los tamices superiores. También se verificó una disminución en el porcentaje acumulado pasante (%Ca) conforme el tamaño del tamiz aumentó, lo que indica una adecuada clasificación granulométrica.

3. 5. 4. Diámetro medio

Tabla III-19

Diámetro medio para malla 1mm

MALLA 1 mm				
DIAMETRO MEDIO	FORMULA	MAIZ	TRIGO	FRIJOL
De masa Dw	$D_w = \sum X_i \cdot D_i =$	0,426	0,324	0,263
De volumen Dv	$D_v = \left(\frac{1}{\sum \frac{\Delta X_i}{D_i^3}} \right)^{\frac{1}{3}} =$	0,676	0,589	0,529

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III-20*Diámetro medio para malla 2mm*

MALLA 2 mm				
DIAMETRO MEDIO	FORMULA	MAIZ	TRIGO	FRIJOL
De masa Dw	$D_w = \sum X_i \cdot D_i =$	0,512	0,468	0,475
De volumen Dv	$D_v = \left(\frac{1}{\sum \frac{\Delta X_i}{D_i^3}} \right)^{\frac{1}{3}} =$	0,663	0,634	0,744

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III-21*Diámetro medio para malla 3mm*

MALLA 3 mm				
DIAMETRO MEDIO	FORMULA	MAIZ	TRIGO	FRIJOL
De masa Dw	$D_w = \sum X_i \cdot D_i =$	0,598	0,756	0,657
De volumen Dv	$D_v = \left(\frac{1}{\sum \frac{\Delta X_i}{D_i^3}} \right)^{\frac{1}{3}} =$	0,686	0,816	0,668

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3. 5. 5. Cálculo de la eficiencia del proceso de molienda

Finalmente, dentro de la eficiencia del molino, incluyendo a todas las muestras y a los diferentes tamices utilizados podemos determinar la eficiencia.

$$A = B + C \quad (59)$$

Donde:

A: Masa de los granos previa molienda (g)

B: Masa de muestras que sale del sistema post-molienda. (g)

C: Masa retenida dentro del sistema de molienda y tamiz.

$$e_{mtotal} = \frac{B}{A + C} \times 100\% \quad (60)$$

Donde:

$e_{m total}$: Eficiencia del proceso de molienda y tamizado combinado.

$$e_{mtotal} = \frac{(2821,83 + 2899,4 + 2934,81)gr}{9000 gr} \times 100\%$$

$$e_{mtotal} = 96,17\%$$

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE
RESULTADOS

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Tabla IV-1

Caracterización de la materia prima

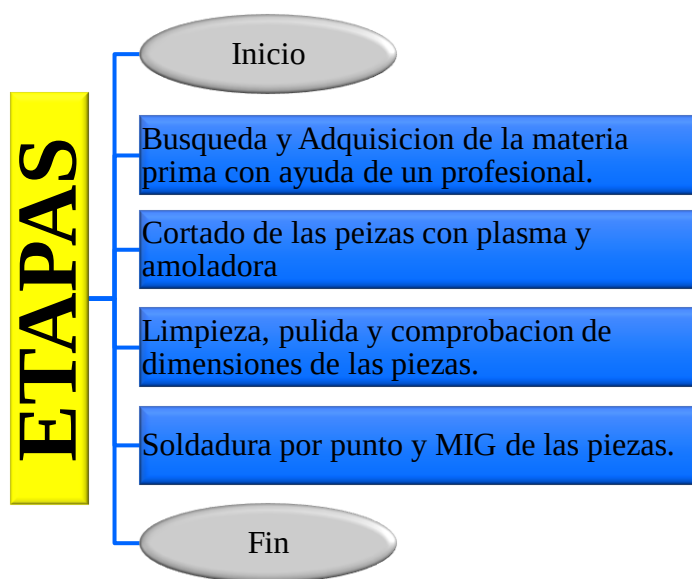
Muestra	Masa (g)	Humedad (%)	Humedad (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Volumen aproximado (cm ³)
Maíz	5	3.48	0.174	0.72	6.94
Trigo	5	1.67	0.0835	0.79	6.33
Frijol	5	0.006	0.0003	0.72	6.94

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.2. CONSTRUCCIÓN DEL MOLINO

Figura 4-1

Diagrama de flujo de la construcción del molino

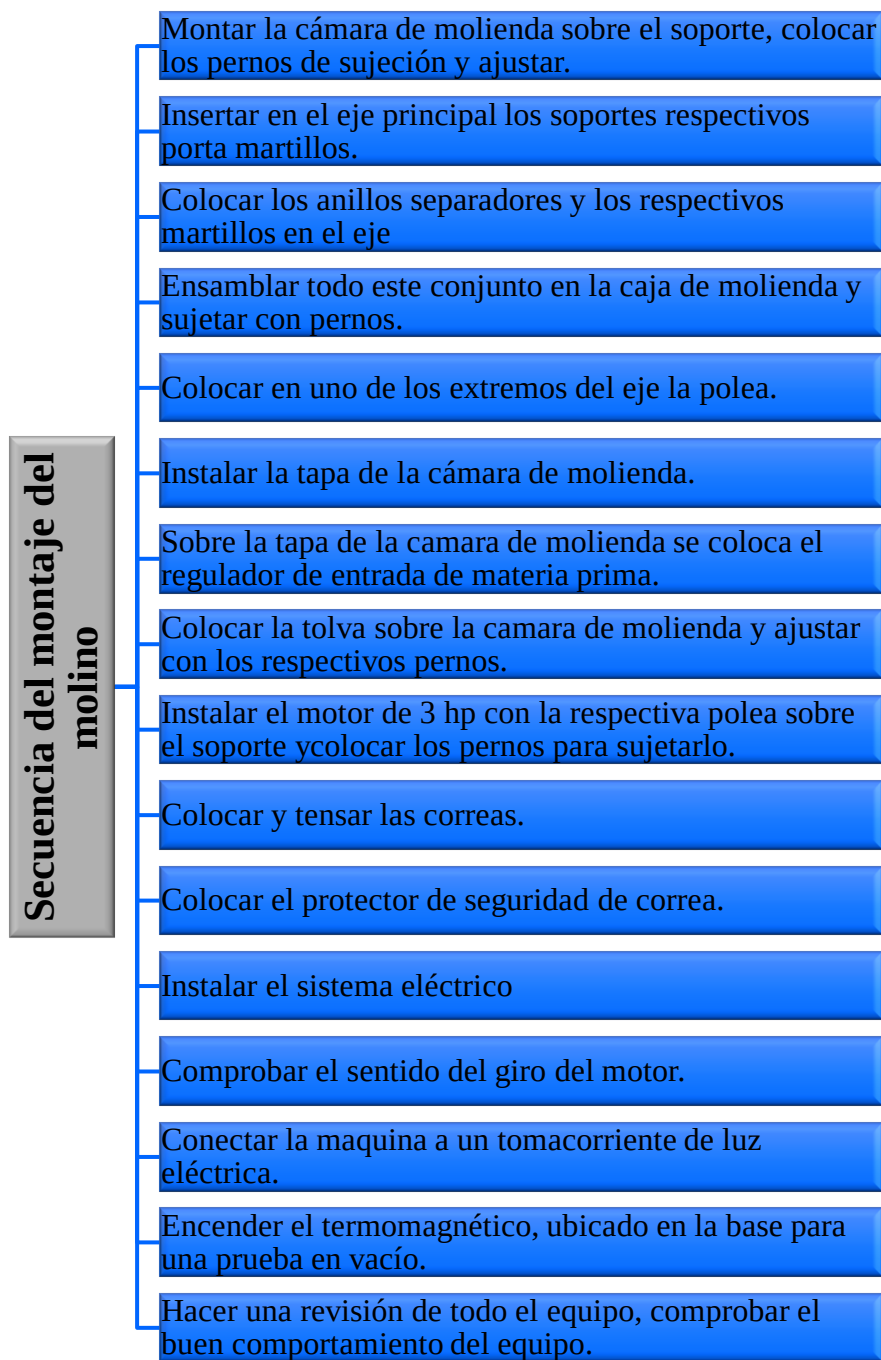


Fuente: Elaboración propia, 2024.

4. 2. 1. Montaje del molino

Figura 4-2

Diagrama del montaje del equipo



Fuente: Elaboración propia, 2024.

4. 2. 2. Descripción de los implementos

Tabla IV-2

Descripción de los componentes del molino

Implemento	Material	Dimensión	Unidad
Tolva	ASTM 131	10000	Cm ³
Cámara de Molienda	ASTM131	3458,4	Cm ³
Martillo	AISI 1018	90 x 4 x 39	mm
Soporte rotor de martillo	HIERRO	92 x 4 x 37	mm
eje	SAE 1045	55,98	Cm ³

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4. 3. RESULTADOS DE VALIDACIÓN DEL EQUIPO

La relación de transmisión es necesaria para la determinación de las poleas ya que esta nos indica los tamaños de cada una y su dependencia a subir o bajar la velocidad del rotor hacia el equipo por diferencia de tamaños. En este caso la relación es casi 1:1 así que el tamaño de poleas puede ser de igual diámetro.

Tabla IV-3

Velocidad tangencial de operación.

Velocidad	Cantidad	Unidades
MAIZ	34,96	m/s
TRIGO	27,65	m/s
FRIJOL	31,26	m/s
VEL DE OPERACION	31,55	m/s

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla IV-4

Energía específica de percusión

Energía	Cantidad	Unidades
Maíz	611,10	J/Kg

Trigo	488,6	J/Kg
frijol	366,93	J/Kg

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla IV-5

Velocidad angular de operación

Velocidad	Cantidad	Unidades
Velocidad angular de operación	2676	RPM

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla IV-6

Relación de transmisión

Velocidad	Cantidad	Unidades
Velocidad del motor	2870	RPM
Velocidad angular de operación	2676	RPM
Relación de transmisión	1,07	

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4. 3. 1. Análisis y discusión de resultados

El molino de martillos, tal como se ha diseñado, demuestra una capacidad efectiva para la molienda de diversos tipos de granos con un alto grado de eficiencia. Los cálculos de velocidad, la capacidad de molienda y la selección de materiales aseguran un rendimiento óptimo para operaciones de molienda. Los resultados obtenidos reflejan que el equipo es adecuado para aplicaciones de molienda de granos, ya que combina robustez, durabilidad y un óptimo procesamiento continuo.

En las gráficas del análisis granulométrico diferencial podemos observar que la acumulación del producto se retiene en la malla 0,5 con las diferentes muestras, debido a la humedad que este contenía, ya que ocasiona la formación de aglomerados, pero por otro lado paso la prueba por el tamiz de 1 mm. Lo que justifica que la malla 1 mm usado en el molino si era eficiente, así como el molino.

Las gráficas de los análisis granulométricos muestran un comportamiento similar para cada grano. Así mismo los diámetros medio de los tres granos muestran valores con poca variación.

4. 4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO

4. 4. 1. Características técnicas del motor utilizado para el molino

Figura 4-3

Motor del molino



Fuente: (WEG, Motor 3 HP 2P G56H 1F 220 V 50 Hz, 2024)

Figura 4-4

Placa de características del motor del molino

ITEM: 10035

MADE IN BRAZIL LR 38324

CE

MOD. DATE: 14ABR0

PH	1	HP(KW)	3.00(2.20)	FR	G56H
V	220	Hz	50		
A	13.50	RPM	2870		
SFA		INS	F	ΔT	80 K
SF	1.00	DUTY	S1	AMB	40 °C
		CODE	H	ENCL	TEFC

WARNING - MOTOR MUST BE GROUNDED IN ACCORDANCE WITH LOCAL NATIONAL ELECTRICAL CODES TO PREVENT SERIOUS ELECTRICAL SHOCK

Diagram showing terminal connections: T5, T8, T1, T4, L1, L2, and ROT.

Fuente Elaboración propia, 2024.

4. 5. REQUERIMIENTOS PRESUPUESTARIOS

4. 5. 1. Análisis de costos

4. 5. 1. 1. Recursos materiales

En esta categoría se incluye todos los elementos comerciales y normalizados, así como los materiales que deben pasar por un proceso de maquinado para tener la geometría y acabado de acuerdo con los planos de fabricación.

Tabla IV-7*Costo de materiales para la construcción del molino*

N°	ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (Bs)	SUBTOTAL (Bs)
1	Acrílico	pieza	1	65	65
2	Angular	pieza	4	2	8
3	Arandelas	pieza	2	0,5	1
4	Barra angular de 1 plg	pieza	1	125	125
5	Barra para eje	pieza	1	130	130
6	Cable	metro	3	15	45
7	Candado y aldaba	pieza	1	13	13
8	Correa	pieza	2	60	120
9	Disco de pulido para hierro #8	pieza	1	36	36
10	Disco de sujeción	pieza	2	45	90
11	Escobilla	pieza	2	10	20
12	Lija	pieza	10	3	30
13	Material electrico	pieza	1	135	135
14	Material para martillos	kilo	2	15	30
15	Motor monofásico WEG 3 HP	pieza	1	2100	2100
16	Pernos y tuercas	pieza	47	2	94
17	Pintura anticorrosiva	litro	1	46	46
18	Pintura sintética	litro	2	36	72
19	Plancha de 3 mm	metro	1,5	540	810
20	Plancha de acero 304 de 1 mm	metro	0,3	626,3	187,89
21	Polea	pieza	2	120	240
22	Primer	litro	1	55	55
23	Ruedas	pieza	2	65	130
24	Tiner	litro	3	22	66
25	Visagras 1 1/2 plg	pieza	2	3	6
				Total (Bs)	4654,89

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4. 5. 1. 2. *Recursos humanos*

La construcción del molino de martillo requiere personal capacitado en el manejo de las siguientes áreas.

Tabla IV-8

Costo de mano de obra requerida para la construcción del equipo

N°	ITEM	HORAS	COSTO HORA (Bs)	SUBTOTAL (Bs)
1	Metalúrgico	46	50	2300
2	Ingeniero mecánico	8	85	680
3	Tornero	4	60	240
4	Electricista	2	25	50
5	Pintor	10	20	200
Total (Bs)				3470

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4. 5. 1. 3. *Prueba de molienda*

Tabla IV-9

Costo de las pruebas de molienda

N°	ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (Bs)	SUBTOTAL (Bs)
1	Bolsas ziploc	pack	1	28	28
2	Frijol	kilo	4	12	48
3	Maíz	kilo	4	8	32
4	Trigo	kilo	4	12	48
5	Análisis fisicoquímico	unidad	4	72	288

N°	ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	SUBTOTAL
				UNITARIO	
				(Bs)	(Bs)
				Total (Bs)	444

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4. 5. 2. Recursos totales

El costo total invertido en la realización de este proyecto de titulación se ilustra en la siguiente tabla, la misma que indica que el costo total de inversión.

Tabla IV-X
Costo total de construcción del molino

N°	ITEM	SUBTOTAL
		(Bs)
1	Materiales	4654,89
2	Mano de obra	3470
3	Operación y pruebas	444
Total (Bs)		8568,89

Fuente: Elaboración propia, 2024.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. 1. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo del proyecto y considerando la información recopilada a lo largo del proceso, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- ❖ Se realizó el diseño de un molino de martillos con modelos matemáticos característicos para este tipo de sistema y modelos de diseño de máquinas que nos permitieron el diseño de la estructura del equipo. El proyecto ha culminado con la construcción de un molino de martillos funcional, capaz de cumplir con los objetivos planteados.
- ❖ Se realizó la caracterización de la materia prima para la molienda el mismo, se determinó que para las mejores condiciones de molienda la humedad debe ser menor al 15%. La caracterización detallada de los granos de maíz, frijol y trigo, así como la evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas, ha sido esencial para entender la molturabilidad de cada material y seleccionar el equipo de molienda adecuado. La importancia de variables como la humedad y la fuerza de fractura se ha destacado, garantizando un proceso de molienda óptimo y eficiente.
- ❖ La distribución de tamaños de partículas varía según el tipo de grano, con el maíz mostrando una mayor retención en tamices finos. En el maíz, se evidenció una concentración de partículas finas, ya que una gran proporción de la muestra se acumuló en tamices inferiores. El trigo presentó una distribución más uniforme, con retención en varias fracciones de tamiz sin una concentración marcada en un solo rango de tamaño. En el frijol, se observó una tendencia similar a la del trigo, aunque con una ligera mayor retención en ciertos tamices, indicando un tamaño de partícula más definido post molienda.
- ❖ Se elaboró el manual de operación y mantenimiento para la realización de prácticas por parte del sector estudiantil para que conozcan los principios de operación de molienda durante su formación académica. Esto no solo enriquece

su conocimiento teórico, sino que también que los prepara para enfrentar desafíos industriales reales.

- ❖ Este proyecto no solo ha logrado diseñar y construir un molino de martillos, sino que también ha contribuido al conocimiento académico y práctico en el campo de la ingeniería de procesos. La aplicación de conceptos científicos y la integración de herramientas educativas aseguran un impacto positivo tanto en la industria como en la formación de futuros profesionales.
- ❖ El molino de martillos construido puede servir como prototipo para el desarrollo de equipos a mayor escala para la industria alimentaria.

5. 2. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda al operario utilizar todas las medidas de seguridad para manipular el equipo con el fin de evitar cualquier accidente o incidente durante el proceso de molienda.
- ❖ Se recomienda respetar la señalética de protección del equipo cuyo fin es informar a los estudiantes y docentes que vayan a hacer uso del equipo de los riesgos a los cuales se encuentran expuestos y así evitar accidentes de laboratorio.
- ❖ Se recomienda al operario utilizar una manga de extracción de harinas para evitar la fuga de polvos y así evitar pérdidas de producto durante el proceso.
- ❖ Para evitar problemas de cavitación del equipo es necesario que cuando se esté alimentando el equipo, el llenado del equipo no exceda el 30% de la capacidad volumétrica interna.
- ❖ Para un manejo adecuado del molino se recomienda emplear la guía de operación del equipo indicada en el ANEXO 7 MANUAL DE USO Y MANTENIMIENTO DEL MOLINO DE MARTILLOS para el arranque del equipo e instalación del mismo.
- ❖ El laboratorio de operaciones unitarias debe realizar mantenimientos periódicos de acuerdo a la necesidad y uso del molino de martillos para evitar los daños causados por este factor.

- ❖ Antes y después de la utilización del molino de martillos es recomendable realizar una limpieza en las partes del equipo para evitar cálculos erróneos en la práctica y contaminación con otros productos.
- ❖ Mantener un registro detallado de todos los parámetros operativos, mantenimiento y resultados de molienda para análisis posteriores y mejora continua del proceso.
- ❖ Investigar e incorporar tecnologías avanzadas, como sensores para monitoreo en tiempo real y sistemas de control automatizados para mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de molienda.