



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	125/ 205

P-3

ANÁLISIS Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE MOLIENDA

1. OBJETIVOS

- CONOCER UN MOLINO DE MARTILLOS E IDENTIFICAR LAS PARTES QUE LO COMPONENTEN.
- REALIZAR UN ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DEL PRODUCTO OBTENIDO DEL MOLINO.
- DETERMINAR LA ENERGÍA REQUERIDA PARA LA REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE ALGUNAS PARTÍCULAS DE UN MOLINO DE MARTILLOS.

2.FUNDAMENTO TEÓRICO

➤ INTRODUCCIÓN

Los términos utilizados para designar las partes de esta operación unitaria de subdivisión mecánica de sólidos, que es continua, se utilizan rara vez con un significado muy definido. Los términos trituración y molienda normalmente están asociadas con el significado de subdividir de mayor a menor volumen una cantidad de material, pero ninguno de los dos términos se utiliza con un significado preciso. Se pueden procesar desde pocos kilogramos por hora, operación a baja escala; hasta cientos de toneladas por hora, ejemplo en la industria minera. A pesar del empleo tan amplio de la maquinaria de trituración en el trabajo de rocas duras en minería, realmente se conoce muy poco de la teoría básica del fundamenta del proceso. Como en otros campos, esta laguna en la teoría y la total confianza en la observación empírica han conducido a una amplia variedad de tipos de maquinaria. Por un proceso de selección natural, más que de análisis; ciertos dispositivos se han hecho indispensables para la trituración de rocas duras y como resultado de ello, la industria de la minería en años recientes se ha normalizado prácticamente, en ciertos tipos, las máquinas para campos específicos de trituración y molienda.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	126/ 205

➤ Clasificación de Maquinaria de Trituración y Molienda

Debido a la gran variedad de dispositivos utilizados, es extremadamente difícil hacer una clasificación rígida de la maquinaria de trituración y molienda. La única clasificación en la que pueden establecerse limitaciones definidas de los grupos es la división de: trituradores bastos, trituradores intermedios y molinos finos. Los trituradores bastos se definen como aquellos tipos de maquinaria que pueden desarrollarse para tomar, como alimentación, masas tan grandes como se deseé. Los trituradores intermedios son aquellas máquinas que pueden tomar masas grandes como alimentación y producen un producto que no pase por el tamiz de malla 200. Los molinos finos se definen como aquellas máquinas que pueden dar un producto que pase por un tamiz de malla 200. De los diferentes dispositivos mencionados una clasificación puede comprender los siguientes tipos:

Trituradores bastos

Trituradores de mandíbulas o de quijada

1. Blake
2. Dodge
3. Excéntrico superior

Trituradores Intermedios

1. De rodillos.
2. De disco,
3. De muelas verticales
4. Desintegradores
5. De martillos

Molinos finos

1. Centrífugos,
2. De piedras de molino
3. De rodillos,
4. De bolas y de tubo
5. Molinos ultra finos



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	127/ 205

Otra clasificación es presentada en la tabla 1, de acuerdo con el tamaño del producto final.

Tabla 1. Clasificación de molinos por tamaño de producto.

Rango de reducción de tamaño	Nombre genérico del equipo	Tipo de equipo
Grueso e intermedio	Molino de gruesos "Crushers"	De rodillos
Intermedio y fino	Molino finos: "Mills o Grinders"	<ul style="list-style-type: none">• De martillo• De disco de atrición• De rodillos
Fino y ultra fino	"Ultrafinegrinders"	<ul style="list-style-type: none">• De martillos• De bolas

Las siguientes Figuras muestran, algunos de los diseños mencionados:

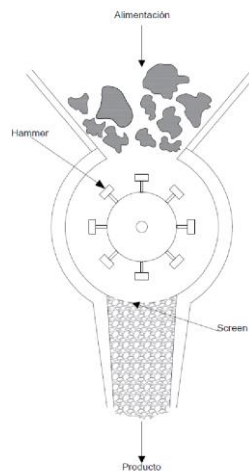


Figura 1. Molino de martillos.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	128/ 205

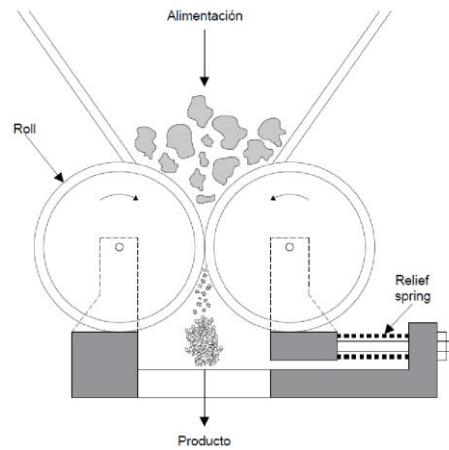


Figura 2. Molino de gruesos de rodillos.

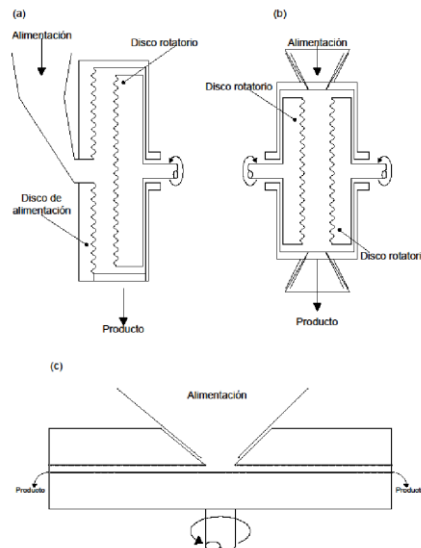


Figura 3. Molino de atrición de discos, a) molino de disco, b) molino de dos discos, c) molino tipo Buhr.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	129/ 205

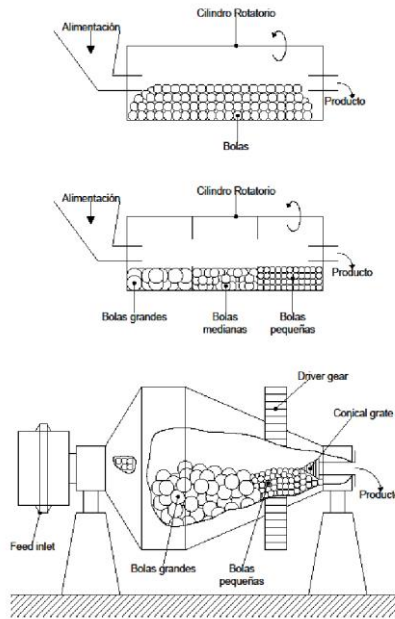


Figura 4. Molino de tambor, a) de flujo rebasante, b) molino de compartimientos, c) molino cónico.

La Tabla 2 Muestra algunas aplicaciones del *molino de martillos*:

Tabla 2. Algunos usos de los molinos de martillos

Tamaño de molienda:	Aplicaciones:
<ul style="list-style-type: none">● Intermedios● Finos/Ultrafinos	<ul style="list-style-type: none">● Frutas secas● Vegetales secos● Granos● Pimienta● Sal● Especies● Azúcar, como el “piloncillo”



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	130/ 205

Hay otras clasificaciones que están en función de diseños de los fabricantes de las empresas que los manufacturan, así como de los que los comercializan con diferentes marcas para mercados especializados donde requieren la reducción del tamaño de materiales, o bien para los clientes que quieren compactar, padecería, para los diferentes usuarios, en diversos negocios.

➤ **Generalidades**

Se reconoce que en esta operación unitaria hay un consumo de energía. Esta se presenta en dos etapas en la rotura tanto de materiales muy duros como muy frágiles, que pueden presentarse en la fractura a lo largo de fisuras existentes en el material, y en la formación de nuevas fisuras, con su posterior fractura.

También, se reconoce que sólo un pequeño porcentaje de la energía suministrada al equipo se usa para la operación de rotura. Se han reportado eficiencias menores al 2%, lo cual indica un proceso muy ineficiente. Gran parte de la energía suministrada se libera como calor, lo cual debe considerarse al procesar alimentos.

Estudios teóricos, realizados en etapas intermitentes, indican que la energía suministrada por unidad de masa procesada para producir un pequeño cambio de tamaño puede expresarse como una función del tipo ley de la potencia con respecto al tamaño de las partículas, como se presenta en la siguiente ecuación general:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{K}{x^n} \quad (1)$$

Donde K es una constante y x es el tamaño de la partícula (diámetro). La ecuación (1) se conoce como la ley general de la ruptura, y una interpretación de esta se presenta en varias leyes propuestas por diferentes investigadores:



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	131/ 205

Rittinger en 1886 consideró que cuando se muele un material. La energía requerida debería guardar una relación con la nueva superficie generada durante la molienda. A continuación, se presenta la deducción:

$$\text{Masa inicial:} \quad m_1 = N_1 \cdot \rho_p \cdot k_y \cdot x_1^3 \quad (2)$$

$$\text{Masa final:} \quad m_2 = N_2 \cdot \rho_p \cdot k_y \cdot x_2^3 \quad (3)$$

Donde k_y es un factor de forma de volumen (por ejemplo, si la partícula es esférica, $(k_y = \frac{\pi}{6})$, N_1 y N_2 representan el número de partículas antes y después de la molienda, respectivamente.

Como las masas iniciales y finales del material a moler y molido deben de ser iguales, puede encontrarse la siguiente relación, empleando las ecuaciones (3) y (2)

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{x_1^3}{x_2^3} \quad (4)$$

La nueva superficie generada durante la ruptura puede calcularse a partir de las superficies inicial y final:

$$\text{Área inicial:} \quad S_1 = N_1 \cdot k_s \cdot x_1^2 \quad (5)$$

$$\text{Área final:} \quad S_2 = N_2 \cdot k_s \cdot x_2^2 \quad (6)$$

Donde k_s es un factor de forma de la superficie (por ejemplo, si la partícula es esférica, $k_s = \pi$).

$$\text{Área generada:} \quad N_2 \cdot k_s \cdot x_2^2 - N_1 \cdot k_s \cdot x_1^2 \quad (7)$$

Remplazando la ecuación (4) en (7) resulta:

P3

$$\text{Energía consumida:} \quad E' = \frac{m_1}{k_v \cdot \rho_p} \cdot k_s \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (8)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	132/ 205

Energía consumida por la masa es:

$$\text{Unidad de masa molida: } E = \frac{E'}{m_1} = \frac{k_s}{k_v \cdot \rho_p} \cdot \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) = C_R \cdot \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (9)$$

Por esta razón en la Ley general de ruptura, la expresión de **Rittinger** puede expresarse como (uso de una potencia de $n = 2$, obteniéndose la ecuación:

$$\left(\frac{dE}{dx} = -\frac{K}{x^2} \right) \quad (10)$$

Cuando la población no es mono dispersa, (de diferentes tamaños) en la expresión de **Rittinger** debería utilizarse los diámetros medios en superficie (x_{NS}).

En la práctica se requiere una energía mucho mayor a la requerida para crear una nueva superficie, por esta razón la ecuación de **Rittinger** es una buena aproximación cuando se busca generar una alta superficie, es decir cuando se realiza una molienda muy fina del material.

Hay otras ecuaciones teóricas para explicar la reducción de tamaño, como es la Ley de **Kick**, propuesta en **1885**, en donde propone que la energía requerida para moler debe ser proporcional a la reducción del tamaño, respecto al inicial.

$$\text{Tamaño inicial: } x_1 \quad (11)$$

$$\text{Tamaño final: } x_2 = x_1 - \Delta x \quad (12)$$

En otras palabras, la energía es proporcional a:

$$\Delta E \propto \frac{\Delta x}{x} \quad (13)$$

Aplicando el límite para cuando Δx tendiendo a 0, conduce a la ecuación de Kick (potencia 1 en la Ley general de rotura):

P3

$$E = K \cdot \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (14)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	133/ 205

La ecuación (14) indica que puede usarse para moler un material de $10 \mu m$ a $1 \mu m$, o de una roca de $1 m$ a bloques de $10 cm$. Obviamente esto no es posible, en un solo equipo. La ecuación de Kick es razonable cuando se procesan materiales gruesos.

La ecuación más usada es de la Ley de Bond propuesta en 1952, la cual se expresa como sigue:

$$E = W_1 \left(\frac{10}{\sqrt{x_2}} - \frac{10}{\sqrt{x_1}} \right) \quad (15)$$

En esta ecuación x_1 y x_2 son el tamaño del tamiz (expresado en micrones) por el cual el 80% del material (de la alimentación y del producto) pasa. W_1 Se denomina índice de trabajo de Bond (Bond workindex). Este parámetro representa la energía requerida, por unidad de masa, para moler un material de tamaño infinito a un tamaño de 100 micrones.

En términos de la ley general de ruptura, la ecuación de Bond puede expresarse como:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{K}{x^{1.5}} \quad (16)$$

La ecuación de **Bond** permite representar la molienda razonablemente para materiales gruesos y finos.

Las ecuaciones presentadas permiten caracterizar la molienda de manera global, y son herramientas útiles para una primera caracterización del proceso de ruptura. De cualquier manera, si se desea conocer el proceso de separación por dispersión del producto de la molienda, el balance de materia es la única herramienta que puede proveer tal información.

Ejemplo 1



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	134/ 205

Para moler partículas de 25 mm se requiere una energía de 20 KJ/Kg. Si la constante de **Kirk** es de 15.7 KJ/Kg. Estimar el tamaño de partículas obtenidas.

Solución:

Datos:

$$E = 20 \text{ KJ/Kg},$$

$$x_1 = 25 \text{ KJ/Kg},$$

$$K = 15.7 \text{ KJ/Kg}, \text{ despejando, } x_2 \text{ de la ecuación (10)}$$

$$x_2 = \frac{x_1}{\exp\left(\frac{E}{K}\right)} = 7 \text{ mm}$$

3. MATERIALES Y EQUIPO

3.1. MATERIALES:

- recipiente para 6 Kg, de materia prima.
- espátula mediana.

3.2 MATERIA PRIMA:

- Bagazo de caña.
- Olotes de maíz.
- Cáscaras secas.
- Granos secos de semillas.
- Trozos de ladrillo (de 5-6 cm).

3.3 SERVICIOS

- Energía Eléctrica, Tres fases, 220 V, 60 Hz, identificando el amperaje y la potencia eléctrica consumida, y estimando un factor de potencia de $\varphi = 0.8$.

P3

3.5 EQUIPO



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	135/ 205

- Molino de Martillos, ver esquema en Anexo 3.3.1,
- Tamizadora
- Juego de Tamices, de la misma marca
- Dos sacos, de lona o nylon con hazas para recibir el producto del equipo.

3.6 MATERIAL BÁSICO

4 El especificado por el profesor

5. PROCEDIMIENTO

- 1) Familiarizarse con el equipo, conociendo sus partes internas.
- 2) Colocar los sacos en las dos salidas del equipo, fijándolos con una cuerda.
- 3) Cerrar la tapa de la tolva.
- 4) Accionar el interruptor eléctrico del motor del equipo.
- 5) Alimentar por la tolva, la materia prima poco a poco, verificando que cuando se llene un primer saco, mover la manija del equipo para descargar el producto al otro saco.
- 6) Cuando se haya recolectado el material introducido, apagar el motor.

➤ Observaciones y recomendaciones

1. En la operación es importante tomar las siguientes medidas de seguridad: Los alumnos que están cerca del equipo deben tener: bata, casco, guantes de carnaza, careta transparente, tapaboca, y tapa oídos.
2. Cuando el equipo esté operado no meter las manos dentro del equipo, ni acercarse a la cara, ya que eventualmente el material es proyectado hacia afuera de la tolva,
3. No hacer cambios en el equipo si estos no son autorizados por el responsable de la planta piloto.
4. Al terminar de usar el equipo limpiar la parte interna del equipo, así como el piso donde haya caído material alimentado y producto, así como los sacos en los que se colectó el producto.

P3

- **Determinación de tamaño de partículas mediante tamizado.**



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	136/ 205

- Tomar tres o más muestras de 200-300 g, del material molido.
- Cada muestra se coloca en la malla superior de un juego de tamices de la misma marca, desde el mayor gramaje como el No 10, intermedios que pueden ser, 40, 80, 120, 170, 230. 400, la selección se realiza por experiencia del Profesor, con cada material determinado,
- Arrancar la tamizadora, con un tiempo de operación programado de 15-20 minutos.
- Recolectar la cantidad de material retenido en cada tamiz y pesarlos, calcular el peso total del producto obtenido.

6. TRATAMIENTO DE DATOS

Se realizan con las ecuaciones presentadas en la sección de generalidades, con las ecuaciones de **Rittinger**, **Kick** o **Bond**. También aplicando un **Balance de Materia y Energía**, considerando que todo el material que entra sale. Se requieren muchos análisis particulares de diversas muestras. Los datos recolectados se tabulan en las Tablas siguientes:

Tabla 3. Datos para un Análisis de Partículas

Muestra 1			Muestra 2			Muestra 3		
Malla	Diámetro	Malla	Diámetro	Peso	Peso	Malla	Diámetro	Peso
No	Partícula	No	Partícula	Retenido	Retenido	No	Partícula	Retenido

Con los datos de la Tabla 3 y un análisis pertinente se presentan los siguientes resultados



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	137/ 205

a.- Análisis diferencial

Tabla 4. Resultados del análisis diferencial.

Muestra 1			Muestra 2			Muestra 3		
Malla	$\Delta\theta_n$	DP_n	Malla	$\Delta\theta_n$	DP_n	Malla	$\Delta\theta_n$	DP_n
No			No			No		

b.- Análisis acumulativo

Tabla 5. Resultados del análisis acumulativo

Muestra 1			Muestra 2			Muestra 3		
Malla	\emptyset	D_p	Malla	\emptyset	D_p	Malla	\emptyset	D_p

Con los datos del análisis diferencial, se grafica $\Delta\emptyset_n$ vs DP_n en papel logarítmico y se ajustan los puntos a una recta para calcular los valores de K, E' y E para cada muestra. Que son similares a los predichos mediante la Ecuación de **Rittinger**.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE
PROYECTOS DE 6º SEMESTRE



Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-ML01	07/12/2018	1	138/ 205

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Mc. Cabe L Warren. (1978) *Operaciones Básicas De Ingeniería Química* Ed. En español Editorial Reverté, Barcelona.
2. Perry H. Robert *Manual del Ingeniero Químico* tomo V, sexta edición, McGraw-Hill, México.
3. Dekker Lu, G. Q. (2004) *Modeling and simulation of material selection and mechanical design*/New York: M. Nanoporus materials, London: imperial college press.
4. Austin, L.G., Trass O., (1997) *Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment*, Capítulo 12 en Handbook of Powder Science & Technology, editadopor Fayed, M.E., Otten, L., Chapman & Hall, N.Y.
5. Gupta, A., Yan, D., (2006) *Mineral Processing and Operation*, Elsevier.
6. Litster, J. Ennis, B., Liu, L., (2004) *The Science and Enginnering of Granulation Process*, Kluwer Academia Publishers.
7. Ramkrishna, D., Population Balances. (2000) *Theory and Applications to Particulate Systems in Engineering*, Academic Press, USA.