



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

*ANÁLISIS DEL CONSUMO DE POTENCIA DURANTE LA MOLIENDA
DE GARBANZO Y LENTEJA A PARTIR DE LAS LEYES DE RITTINGER Y
BOND COMPARANDOLAS CON EL CONSUMO REAL*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTAN:

KARINA ENCISO DOMÍNGUEZ

NOEMI DUARTE PEÑALOZA

ASESOR: I. A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México 2010.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

Resumen.....	8
Introducción.....	10
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	
1.1. Reducción de tamaño.....	12
1.1.1. Mecanismos de reducción de tamaño.....	13
1.1.2. Energía necesaria para la reducción de tamaño.....	15
1.1.2.1. Ley de Rittinger.....	15
1.1.2.2. Ley de Kick.....	14
1.1.2.3. Ley de Bond.....	16
1.1.3. Equipo para la reducción de tamaño.....	19
1.1.3.1. Molino de martillos.....	20
1.2. Materia Prima.....	22
1.2.1. Garbanzo.....	22
1.2.1.1. Definición y descripción física.....	22
1.2.1.2. Origen.....	23
1.2.1.3. Composición Química.....	23
1.2.1.4. Variedades.....	23
1.2.1.5. Países Productores.....	25
1.2.1.6. Harina de garbanzo.....	25
1.2.2. Lenteja.....	26
1.2.2.1. Definición y descripción física.....	26
1.2.2.2. Origen.....	26
1.2.2.3. Composición Química.....	27
1.2.2.4. Variedades.....	27
1.2.2.5. Países Productores.....	29
1.2.3. Características físicas y químicas de las materias primas de importancia durante la molienda.....	29
1.2.3.1. Dureza.....	30
1.2.3.2. Contenido en grasas y aceites.....	30
1.2.3.3. Tamaño y Forma.....	31
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	
2.1. Problema.....	32
2.2. Objetivo general.....	32
2.3. Hipótesis.....	32
2.4. Cuadro metodológico.....	33
2.5. Desarrollo experimental.....	34
2.5.1. Humedad.....	34
2.5.2. Dureza.....	34
2.6. Etapa 1.....	35
2.6.1. Objetivo particular 1.....	35
2.6.1.1. Diámetro equivalente.....	35

2.6.2. Objetivo particular 2.....	36
2.6.2.1. Diseño de dosificador.....	36
2.6.2.2. Determinación de velocidades de alimentación.....	37
2.6.3. Objetivo particular 3.....	38
2.6.3.1. Molienda y determinación del consumo real.....	39
2.6.3.2. Tamizado.....	41
2.7. Etapa 2.....	42
2.7.1. Objetivo particular 4.....	42
2.7.1.1. Determinación de constantes.....	43
2.7.1.2. Predicción del consumo de potencia.....	44

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Pruebas preliminares.....	45
3.1.1. Humedad.....	45
3.1.2 Dureza.....	46
3.2. Etapa 1.....	47
3.2.1. Diámetros equivalentes.....	47
3.2.2. Determinación de velocidades de alimentación.....	48
3.2.3. Análisis Granulométrico.....	50
3.2.3.1. Garbanzo.....	50
3.2.3.2. Lenteja.....	51
3.2.4. Diámetro sauter.....	53
3.2.5. Consumos de potencia reales.....	54
3.3. Etapa 2.....	56
3.3.1. Diámetro equivalente.....	56
3.3.2. Velocidades de alimentación.....	57
3.3.3. Análisis Granulométrico.....	59
3.3.3.1. Garbanzo.....	59
3.3.3.2. Lenteja.....	60
3.3.4. Diámetro sauter.....	61
3.3.5. Consumos de potencia para determinar constantes y predecir consumos de potencia.....	62
3.3.5.1. Garbanzo y lenteja.....	63
3.3.6. Constantes de Rittinger y Bond.....	64
3.3.6.1. Garbanzo.....	65
3.3.6.2. Lenteja.....	67
3.3.7. Comparación de potencia teórico-experimental.....	69
3.3.7.1. Garbanzo.....	69
3.3.7.2. Lenteja.....	72
Conclusiones.....	75
Referencias.....	78

INDICE DE TABLAS

Número	Título	Página
1	Composición química del garbanzo	23
2	Composición de harina de garbanzo	25
3	Composición química de la lenteja	27
4	Aberturas de dosificador para ambos materiales etapa 1	37
5	Aberturas de dosificador para ambos materiales etapa 2	42
6	Porcentaje de Humedad para Garbanzo	46
7	Porcentaje de Humedad para Lenteja	46
9	Datos Estadísticos de diámetro equivalente para Garbanzo etapa 1	48
10	Datos Estadísticos de diámetro equivalente para Lenteja etapa 1	48
11	Tiempos para determinar las velocidades de alimentación para garbanzo etapa 1	49
12	Tiempos para determinar las velocidades de alimentación para lenteja etapa 1	50
13	Diámetros sauter para Garbanzo etapa 1	54
14	Diámetros sauter para Lenteja etapa 1	54
15	Consumos de potencia para garbanzo y lenteja etapa 1	56
16	Datos Estadísticos de diámetro equivalente para garbanzo etapa 2	57
17	Datos Estadísticos de diámetro equivalente para lenteja etapa 2	57
18	Tiempos para determinar las velocidades de alimentación para garbanzo etapa 2	58
19	Tiempos para determinar las velocidades de alimentación para lenteja etapa 2	59
20	Diámetros sauter para Garbanzo etapa 2	62
21	Diámetros sauter para lenteja etapa 2	63
22	Consumos de potencia para garbanzo y lenteja etapa 2	64
23	Resumen de resultados obtenidos del promedio de potencia	65

experimentales y constantes para garbanzo y lenteja etapa

24	Tabla de Anova y prueba de Tukey para garbanzo a) Rittinger b) Índice de trabajo	67
25	Tabla de Anova y prueba de Tukey para lenteja a) Rittingerb) Índice de trabajo	69
26	Comparación de potencias predichas por las leyes y las potencias reales para garbanzo	70
27	Tabla de Anova y prueba de Tukey para garbanzo a) Rittinger b) Índice de trabajo	72
28	Comparación de potencias predichas por las leyes y las potencias reales para lenteja	73
29	Tabla de Anova y prueba de Tukey para garbanzo a) Rittinger b) Índice de trabajo	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Número	Leyenda	Página
1	Métodos de reducción de tamaño	12
2	Partes principales del molino de martillos	21
3	Planta del garbanzo	22
4	Garbanzo Kabuli	24
5	Garbanzo Desi	24
6	Garbanzo Gulabi	24
7	Planta de lenteja	26
8	Lenteja Vulgaris	28
9	Lenteja Variabilis	28
10	Lenteja Dupuyensis	29
11	Forma geométrica de garbanzo y lenteja	31
12	Determinación de humedad por termobalanza	34
13	Determinación de dureza	34
14	Dosificador	37
15	Imagen externa e interna del Molino de Martillos	39
16	Dimensiones frontales del equipo, del eje y de los martillos del molino	40
17	Multímetro de Gancho	41
18	Equipo de agitación Ro-tap	41
19	Gráfica de distribución de tamaño a las diferentes velocidades de alimentación para garbanzo etapa 1	51
20	Gráfica de distribución de tamaño a las diferentes velocidades de alimentación para lenteja etapa 1	52
21	Gráfica comparativa de velocidades de alimentación de garbanzo-lenteja etapa 1	53
22	Gráfico de distribución de tamaño a las diferentes velocidades de alimentación de Garbanzo etapa2	59

23	Gráfico de distribución de tamaño a las diferentes velocidades de alimentación de lenteja etapa 2	60
24	Gráfica comparativa de materiales Garbanzo-Lenteja etapa 2	61
25	Constantes de Rittinger y Bond para garbanzo	65
26	Constantes de Rittinger y Bond para lenteja	67
27	Comparación entre potencias Rittinger y Bond garbanzo	70
28	Comparación de potencias de Rittinger y Bond para lenteja	74

RESUMEN

Se llevó a cabo la molienda de garbanzo y lenteja en un molino de martillos móviles a diferentes velocidades de alimentación las cuales se establecieron mediante pruebas preliminares a través de un dosificador, colocando a la salida del molino una criba de abertura constante de 1mm (en donde más del 80% del producto se recuperó) para así realizar un análisis granulométrico que permitiera determinar el tamaño de partícula final.

La experimentación se llevó a cabo en dos etapas; la primera para conocer el consumo de potencia real y la segunda, para el cálculo de las constantes de Rittinger (K_R) y el índice de trabajo de la ley de Bond (W_i), a partir de estas leyes se calculó el consumo de potencia de manera teórica. Para ambos casos se determinó la intensidad de corriente y el voltaje durante la molienda. Al final se realizó una comparación entre las predicciones de consumo de potencia por las leyes de Rittinger y Bond con los consumos reales.

Para la comparación se empleó un análisis de varianza, el cual evidenció la importancia de la velocidad de alimentación. Se observó que con su aumento como en el caso de lenteja en velocidades de 96.87 y 118.08 Kg/h se hizo más notoria la diferencia entre la comparación de potencias ya que al ser una molienda restringida por una criba en la salida, el material en altas velocidades de alimentación, no alcanza a salir y se ve forzado a recircularse a la zona de molienda lo que provoca un mayor consumo de potencia. Es así que los modelos matemáticos resultaron más satisfactorios en velocidades bajas (47.55Kg/h, 74.59Kg/h y 84.74Kg/h).

En el consumo de potencia teórico-experimental para garbanzo fue más incierto sobre todo a velocidades bajas, consideramos que esto fue debido a un inadecuado control de las velocidades de alimentación esto por la forma y tamaño del material los cuales representaron un problema durante la molienda; caso contrario para lenteja donde el comportamiento fue más satisfactorio y donde el consumo experimental es similar al predicho por las leyes debido a que se controlaron mejor las velocidades de alimentación.

Por otro lado, se demostró que la mayor dureza del garbanzo fue determinante en la molienda para la homogeneidad y tamaño final obtenido ya que fue más grueso y menos homogéneo con respecto a la lenteja; sin embargo el consumo de potencia fue menor. Esto se observó al comparar los resultados de la distribución de tamaños obtenidos de los análisis granulométricos.

INTRODUCCIÓN

En la industria alimentaria es cada vez más frecuente la necesidad de reducción de tamaño en productos sólidos. Es común que en una línea de producción sea necesario que el material cumpla con características específicas de tamaño para una operación unitaria subsiguiente como es el caso del mezclado ya sea con líquidos o con sólidos o que se desee obtener propiedades en específico que dependan del tamaño de partícula (Helman, 1981). Existen una gran cantidad de equipos para tal fin con diferentes diseños en función de las fuerzas (compresión, impacto, cizalla) que se buscan y en relación a las características del material a moler.

Es sabido que durante la operación de reducción, en donde se deforma y se desarrollan tensiones por acción del equipo, se requiere que la aplicación de fuerza supere la energía de tensión para que el material se fracture en pedazos más pequeños y en consecuencia crear nuevas áreas superficiales (Bagder & Julius, 1986; Geankoplis, 2006). Sin embargo se han citado rendimientos energéticos muy bajos durante esta operación (cifras inferiores al 2%) ya que parte de la energía se disipa en forma de calor, vibración y ruido y solo una pequeña parte es utilizada en la rotura (Brennan y col. 1980; Coello & Tijinov, 2001). Esto puede representar costos elevados y por consecuencia pérdidas económicas significativas a nivel industrial; de aquí la importancia de predecir con exactitud los consumos energéticos.

Para tal efecto, se ha estudiado la relación energía-reducción de tamaño a lo largo del tiempo aunque desafortunadamente hay pocas referencias de trabajos en el área de alimentos que estudien la efectividad en la estimación del consumo de energía, en específico la ley de Rittinger y Bond, durante la molturación de alimentos. Las razones básicas son la gran diversidad de características que hay entre los materiales alimenticios e inclusive entre productos de una misma especie que determinan la resistencia a la ruptura y en consecuencia los resultados en necesidades energéticas.

De la necesidad de poder tener una estimación confiable en el área de alimentos se plantea el objetivo de esta investigación que fue comparar las predicciones de consumo de potencia por medio de las ecuaciones de Rittinger y Bond durante la molienda de dos materiales diferentes, garbanzo y lenteja, en un molino de martillos móviles a diferentes velocidades de alimentación con los consumos reales evaluados durante la molienda de los materiales. La experimentación se llevó a cabo en dos etapas, la primera etapa se realizó con la finalidad de calcular el consumo real mientras que la etapa dos fue utilizada para determinar el consumo teórico de potencia a partir de las ecuaciones de Rittinger y Bond. Finalmente se realizó una comparación.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1. REDUCCIÓN DE TAMAÑO

La molienda es una operación muy importante en la ingeniería de alimentos, siendo su objetivo principal reducir el tamaño e incrementar la relación superficie-volumen (Lewis, 1993). La reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta el tamaño deseado ya sea por una fuerza de aplicación de compresión, impacto, fricción o cizalla.

Los sólidos pueden disminuir de tamaño mediante diversos métodos (figura 1). La compresión o trituración se usa para reducir sólidos duros obteniendo un producto grosero. El impacto nos da como resultado un material grueso, mediano o fino y finalmente la cizalla y abrasión en donde se obtienen productos muy finos (Geankoplis, 2006).

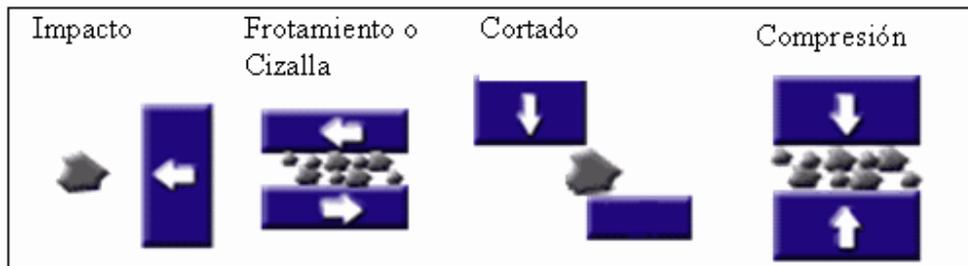


Fig. 1. Métodos de reducción de tamaño (<http://www.monografias.com>)

Es de suma importancia la distinción de la trituración y la molienda ya que estos términos comúnmente se confunden, la diferencia entre estos dos conceptos radica en el tamaño de la alimentación que ingresa al equipo; se habla de una trituración cuando se parte de una alimentación con dimensiones mayores de 5 cm llegando a extremos de 120 a 150 cm. La molienda toma materiales con dimensiones menores y será media, fina o ultra fina (Brennan, 1998).

Las razones que justifican esta operación son diversas entre las cuales se tiene:

- Aumento del área superficial del sólido.
- Obtención de determinadas propiedades que dependen del tamaño de partícula.
- Facilitan procesos posteriores como mezclado, secado, extracción con solventes, reacciones químicas etc.
- Dar características finales para su presentación comercial (Helman, 1991).

1.1.1. MECANISMO DE REDUCCIÓN DE TAMAÑO

En la zona de molienda del equipo las fuerzas aplicadas (impacto, cizalla, compresión, abrasión) van a actuar sobre la masa total del sólido allí contenido y no sobre las partículas individuales; en trabajos realizados por Heywood y Piret (Helman, 1981) han mostrado que a pesar de la complejidad de la reducción de tamaño se puede asegurar que la energía necesaria para el mismo dependerá de la estructura interna del material (Helman, 1981).

El primer paso del proceso consiste en que las partículas de la alimentación se deformen y desarrollen tensiones por acción del equipo de reducción de tamaño. El equipo trabaja para crear esfuerzos en las partículas los cuales se almacenan temporalmente en forma de energía de tensión, a medida de que se le aplica más fuerza, la energía de tensión excede su nivel ocasionando que el material se fracture en pedazos más pequeños. Cuando el material se fractura se crean nuevas áreas superficiales (Geankoplis, 1993; Earle, 1988).

La fuerza aplicada, entonces tiene una gran importancia, ya que el material solo puede sufrir una deformación elástica, es decir deformarse dentro del límite de elasticidad y por lo tanto recobrar su forma original cuando esta deje de actuar sobre él, por lo cual se requiere que se sobrepase ese límite elástico para que sufra una deformación permanente (Brennan, 1980).

Parece que el tamaño de las partículas finas está estrechamente relacionado con la estructura interna del material, mientras que el tamaño de las partículas mayores está más ligado al proceso por el cual se efectúa la reducción de tamaño (Coulson, 1981).

1.1.2. ENERGÍA NECESARIA PARA LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO

La energía precisa para la rotura de las partículas crece a medida que disminuye su tamaño. La energía almacenada en el proceso de deformación se pierde durante la recuperación en donde el esfuerzo aplicado cesa. La deformación elástica y la fracción de las partículas, convierten a la reducción de tamaño en una operación muy ineficiente con un rendimiento energético pobre.

Se acepta que solo una pequeña parte de la energía consumida por un equipo de desintegración se utiliza en la rotura, se tienen cifras inferiores del 2 %, la mayor parte de la energía consumida se pierde en forma de calor, ruido, fricción y vibración (Brennan, 1998).

La energía requerida para la reducción de tamaño se ha demostrado que depende de las características del material como su forma, tamaño, dureza, contenido de humedad y otros.

No existe un consenso general en una expresión que permita obtener ese valor de energía con seguridad para todos los casos a pesar de conocerse dos leyes con tal pretensión y más tarde una más que supone superar a las dos anteriores. Todas esas expresiones se deducen partiendo de la misma expresión “La energía necesaria para efectuar una cierta reducción de tamaño en una partícula sólida es función exponencial del tamaño inicial”.

La mayoría de las ecuaciones empleadas para este fin surgieron a partir de la llamada “ley general de molienda” propuesta por Walker ecuación 1, (Austin, 1972).

$$dE = C \frac{dX}{X^n} \quad (1)$$

Donde:

X= diámetro de la partícula (mm).

E= relación potencia entre velocidad de alimentación (W h /kg).

n= constantes que dependen del tipo de material.

C= constantes que dependen del tipo de material.

(Austin, 1972; McCabe y col. 2007)

Entre estas ecuaciones destacan la ley de Rittinger y la ley de Bond en la aplicación de la molienda media y fina.

1.1.2.1. LEY DE RITTINGER

La ley de Rittinger fue propuesta en 1867 donde se consideró que durante la molienda de los sólidos, la energía necesaria debe ser proporcional a la nueva superficie formada dando en la ecuación 1, un valor de exponente igual a 2. Esta ecuación puede ser expresada, una vez integrada, como sigue (McCabe y col. 2007):

$$\frac{P}{T} = K_R \left(\frac{1}{X_2} - \frac{1}{X_1} \right) \quad (2)$$

Donde:

P= potencia (Watts).

T= velocidad de alimentación (kg/h).

K_R = constante de Rittinger (Whmm/kg).

X_1 = diámetro medio de la alimentación (mm).

X_2 = diámetro medio del producto (mm).

(Geankoplis, 2006)

1.1.2.2. LEY DE KICK

Propuesta en 1885, esta ley supone que la energía requerida para la reducción de tamaño es constante siempre y cuando se mantuviera constante la relación de los tamaños inicial y final. Esto significa que $n=1$ (Mc Cabe, 1999; Geankoplis, 2005).

$$\frac{P}{T} = K_K \ln \left(\frac{X_1}{X_2} \right) \quad (3)$$

Donde:

P= potencia (Watts).

T= velocidad de alimentación (kg/h).

K_R = constante de Kick.

X_1 = diámetro medio de la alimentación (mm).

X_2 = diámetro medio del producto (mm).

(Austin, 1972; Earle, 1988; Geankoplis, 2006)

1.1.2.3. LEY DE BOND

Las leyes propuestas por Rittinger y Kick han probado sus aplicaciones solo sobre un intervalo muy limitado de condiciones. Una manera más realista de estimar la energía requerida para la trituración y molienda fue expuesta por Bond. El sugirió una ley intermedia entre Rittinger y Kick, considerando que $n=1.5$. Esta ecuación resultó en una estimación de la energía necesaria tanto para la trituración como para la molienda y establece que la potencia consumida es proporcional a la raíz cuadrada de la relación superficie/volumen de producto.

$$\frac{P}{T} = K_B \frac{1}{\sqrt{X_2}} \quad (4)$$

Donde:

P= potencia (Watts).

T= velocidad de alimentación (kg/h).

K_B = constante de Bond.

X_2 = diámetro medio del producto (mm).

Bond propuso una constante que dependía de las características del material, el índice de trabajo, W_i , que se define como el trabajo en kW h/ton que se requiere para reducir una unidad de peso desde un tamaño muy grande hasta un tamaño tal que el 80% pase por un tamiz de 100 μ m. La ecuación de Bond, considerando que el producto llega a estos 100 μ m, es:

$$\frac{P}{T} = 1.46W_i \left(\frac{1}{\sqrt{X_2}} - \frac{1}{\sqrt{X_1}} \right) \quad (5)$$

Donde:

P= potencia (Watts).

T= velocidad de alimentación (Ton/h).

W_i= índice de trabajo (kW h/ton).

X₁= diámetro promedio de alimentación (ft).

X₂= tamaño del producto (ft).

(Perry & Chilton, 1982; Geankoplis, 2006)

La mayoría de las investigaciones para estimar el consumo de energía han sido dirigidas hacia la industria minera por la importancia que tienen estos materiales al ser reducidos para posteriores usos, debido a que los consumos energéticos gastados durante esta operación son elevados.

Entre estas investigaciones tenemos a la evaluación del consumo de energía modificando el diseño de revestimiento en un molino discontinuo (Valderrama & Magne, 1996) cargado con bolas, cilindros o granallas de tamaño uniforme. En este trabajo se modificaron el volumen de llenado, altura de levantadores, número de levantadores y el ángulo de ataque de levantadores (30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°). El ángulo resultó la variable que más influyó mostrando los mayores consumos con el ángulo de 45°, mientras que cuando el molino es equipado con levantadores con alto ángulo de ataque el consumo de potencia decrece.

A su vez Coello y col. (2000), tras sus observaciones durante la molienda de un mineral laterítico (mineral rico en óxidos de coloración rojo), en un molino de bolas cilíndrico-cónico, realizó un análisis energético del proceso de molienda en dos condiciones: con material y con ausencia ocasional del mismo pero con el molino trabajando. Llegó a la conclusión de que las ausencias ocasionales de mineral en el sistema originan elevados picos de potencia lo cual ocasiona una oscilación apreciable en la energía consumida; entre las observaciones fundamentales de estos picos de potencia se tiene que son ocasionados por la

formación de arcos dentro del interior de la tolva de alimentación lo que provoca un trabajo irregular en la carga de alimentación llegando incluso a trabajar en vacío provocando un mayor gasto energético.

Gutsche & Fuerstenau (2004) trabajaron con un molino de rodillos controlando la relación de tamaño de las partículas y el claro entre rodillos. Encontraron que la molienda de partículas de minerales de dolomita, galena y cuarzo tenía una función potencia con la relación de tamaño expresada como diámetro. Así mismo demostraron que los datos de consumo de energía para la dolomita y el cuarzo se ajustaron a la Ley de Rittinger.

Desde otro punto de vista, Tousimi y col. (2007) demostraron la dependencia del diámetro final obtenido con la velocidad de alimentación durante la molienda de minerales de olivino¹.

En el área de alimentos estos estudios han sido limitados. La gran diversidad en características de los materiales alimenticios representa un reto para los investigadores. Es así que los trabajos en esta área son muy específicos.

Ejemplo de ello lo demuestran los trabajos de Kusinska y col. (2008) y de Grochowicz & Andrejko (2006) quienes evaluaron maíz y semilla de lupino² respectivamente en diferentes condiciones de humedad. Ambos demostraron la dependencia del consumo energético con el contenido de humedad.

Beshada y col. (2006) diseñaron un molino de piedra y evaluaron el consumo de energía para maíz, trigo y cebada en diferentes condiciones de trabajo y de humedad. Ellos encontraron los mayores consumos para el maíz.

¹ Olivino: Mineral de hierro y magnesio, pertenece al grupo de los silicatos (combinación de sílice con otros óxidos) de coloración verde parduzco, se halla en las rocas de origen magmático.

² Lupino: Familia de las leguminosas su principal uso es en la alimentación humana, animal y también como plantas ornamentales.

En un trabajo previo con canela y pimienta se encontró que las características de dureza así como las características geométricas de los materiales son determinantes en el consumo de energía. Para este trabajo se molieron los materiales en tres diferentes equipos, un molino de martillos colgantes, un molino de martillos dentados y un molino de cuchillas. Los resultados demostraron que la mayor dureza de la pimienta con respecto a la canela resultó en mayores consumos de energía. Así mismo se demostró la importancia que tiene el principio de operación del equipo utilizado (Cortazar y col. 2008).

Djantou y col. (2006) determinaron las constantes de molienda así como la energía de molienda y el diámetro medio (volumen/superficie) para diferentes pre-tratamientos de secado de mango y su posterior molturación. Estos investigadores compararon una constante K_d obtenida de un modelo cinético que se ajustó a la molienda de estos materiales con las constantes de Bond, Kick y Rittinger encontrando diferencias significativas.

La pretensión de este trabajo es de comparar el consumo real de potencia con lo que predicen las leyes de Rittinger y Bond considerando la molienda de garbanzo y lenteja como una molienda fina y así dar una propuesta para poder conocer previamente el consumo de energía en materiales alimenticios en la industria.

1.1.3. EQUIPO PARA LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO

Los equipos para la reducción de tamaños se clasifican de acuerdo con la forma en la que se aplican las fuerzas:

- Entre dos superficies: trituración y corte
- En una superficie sólida: impacto o choque
- Por acción del medio circundante: molinos coloidales

Una clasificación más práctica consiste en dividir los equipos en trituradores (quijadas, blake, giratorios y rodillos), molinos (martillo, giratorio, de bolas), molinos finos y cortadores.

Es de suma importancia conocer cuanto sea posible sobre las características del producto de

alimentación para poder seleccionar el equipo a emplear para así tener una mayor eficiencia durante la operación.

Durante la experimentación se empleó un molino de martillos móviles ya que es uno de los molinos que se adapta a una amplia gama de materiales cubriendo desde una molienda grosera hasta la fina.

1.1.3.1. MOLINO DE MARTILLOS.

Estos molinos contienen un rotor que gira a alta velocidad en el interior de una carcasa. El eje generalmente es horizontal. La alimentación entra por la parte superior de la carcasa, se trocea y cae a través de una abertura situada en el fondo.

En un molino de martillos las partículas se rompen por una serie de martillos giratorios acoplados a un disco rotor. Una partícula que entra en la zona de molienda no puede salir sin ser golpeada por los martillos. Se rompe en pedazos, se proyecta contra la placa estacionaria situada dentro de la carcasa rompiéndose todavía en fragmentos más pequeños. Con frecuencia se montan sobre el mismo eje varios discos rotores, cada uno de 6 a 18 pulg (150 a 450 mm) de diámetro y con cuatro a ocho martillos. Los martillos pueden ser barras rectas de metal con los extremos planos o alargados, o bien afilados para formar un borde cortante. Los molinos de martillos con reducción de tamaño intermedio dan lugar a un producto con un tamaño de partículas de 1 pulg (25 mm) a 20 mallas. Estas a su vez son pulverizadas por los martillos y son impulsadas a través de una rejilla o tamiz que cubre la abertura de descarga.

En molinos de martillos para una molienda fina la velocidad periférica de los extremos de los martillos puede llegar a ser 112 m/s, y tratan de 0.1 a 15 toneladas/h hasta tamaños más finos que 200 mallas. Los molinos de martillos pueden tratar casi cualquier producto: sólidos fibrosos como cortezas o cuero, virutas de acero, pastas blandas y húmedas, arcilla plástica o una roca dura.

Estos equipos son los más difundidos ya que abarcan desde la molienda grosera hasta la fina,

admiten materiales fibrosos si se utiliza martillos con bordes cortantes, pero no pueden trabajarse con materiales con tendencia a adherirse o empastarse (McCabe y col, 1999). En la figura 2 se presenta esquemáticamente el mecanismo de acción de estos equipos.

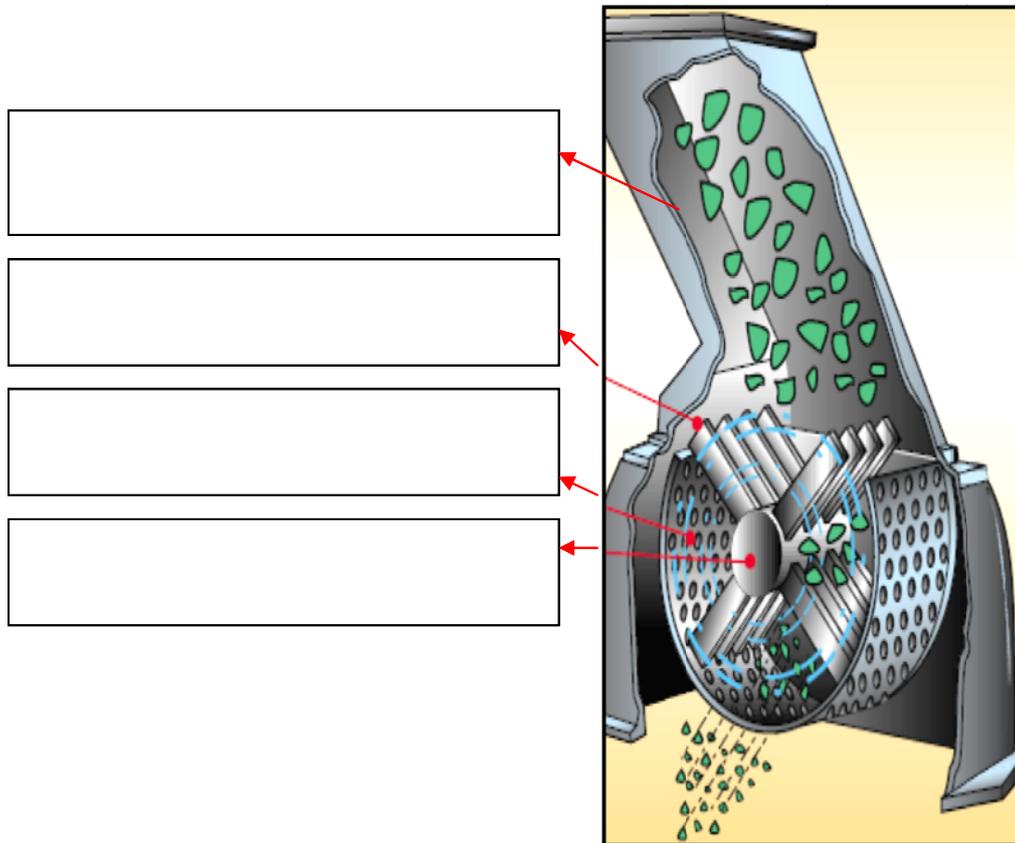


Fig. 2. Partes principales del molino de martillos (www.the fitzpatrick company)

1.2. MATERIA PRIMA

1.2.1. GARBANZO

Nombre científico: *Cicer Arietinum*.

1.2.1.1. DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN FÍSICA

Es una mata pequeña, herbácea anual resistente a la sequia. La planta tiene raíces profundas, tallos pelosos y ramificados que alcanzan una altura de 45 a 60 cm con numerosas glándulas excretoras. Las hojas pueden ser pinnadas o imparipinnadas, en donde los folíolos tienen el borde dentado. Las flores son normalmente solitarias y se forman en las axilas de las hojas sobre un pedúnculo de 2.5 a 4 cm. Los frutos son en vaina bivalva con una o dos semillas en su interior que suelen ser algo arrugadas con dos grandes cotiledones (Aykroyd & Doughty, 1964; Guerrero, 1984; Gordillo, 1991).

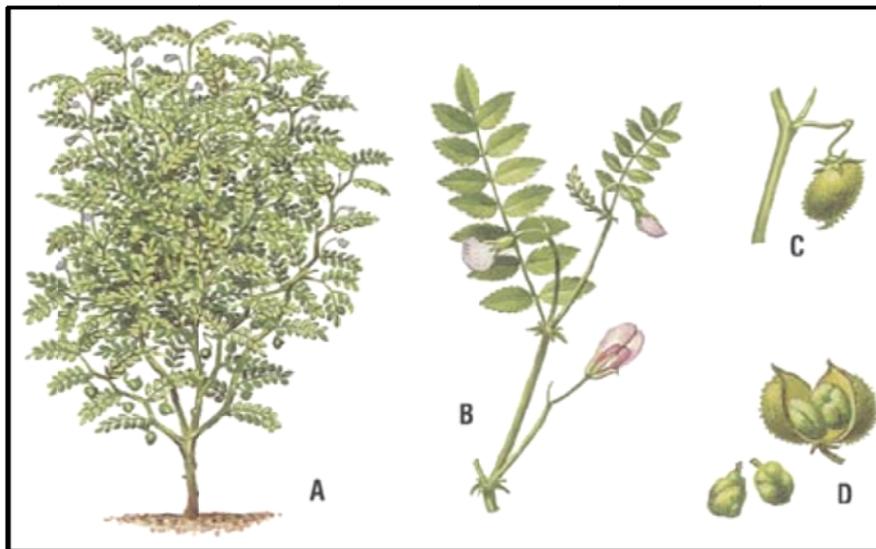


Fig. 3. Planta del garbanzo (A); rama con hojas y flores (B); ramita con frutos en legumbre (C); legumbre abierta y semillas sueltas (D) (www.ebrisa.com)

1.2.1.2. ORIGEN:

El origen del garbanzo es un poco confuso. Algunos botánicos consideran que esta especie no existía en forma silvestre, sino que se desarrolló artificialmente mediante cuidados humanos, el cultivo del garbanzo se localiza en el suroeste de Turquía. Desde allí se extendió muy pronto hacia Europa (especialmente por la región mediterránea) y más tarde a África (fundamentalmente Etiopía), América (especialmente México, Argentina y Chile) y Australia. Se ha comprobado la existencia de 40 especies de garbanzos extendiéndose desde Oriente Medio, Turquía, Israel y Asia Central (Kay ,1979).

1.2.1.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA:

Tabla 1. Composición química del garbanzo

Valor nutricional del garbanzo en 100 g de sustancia	
Contenido energético	
De los comestibles digestibles KJ:1.292	
De los 100g de porción comestible Kcal: 304	
Componente	(g)
Agua	11.0
Proteína	19.8
Grasa	3.4
Carbohidratos	48.6
Fibra	10.7
Sales minerales	2.7

Fuente: Kraut, S.F. (1991)

1.2.1.4. VARIEDADES

Existen 3 tipos de garbanzos, que corresponden fundamentalmente a diferencias en el tamaño, forma y coloración de las semillas:

- Kabuli: Tamaño del garbanzo medio a grande, redondeados y arrugados, color claro y flores no pigmentadas.



Fig. 4. Garbanzo Kabuli (www.legumex.com)

- Desi: Grano de tamaño pequeño, formas angulares y color amarillo o negro. Las flores y los tallos son, generalmente, pigmentados, y en algunas ocasiones también las hojas.



Fig. 5. Garbanzo Desi (www.legumex.com)

- Gulabi: Grano de medio a pequeño tamaño, liso, redondeado y de color claro (Godillo, 1991).



Fig. 6. Garbanzo Gulabi (www.legumex.com)

1.2.1.5. PAÍSES PRODUCTORES

El garbanzo es el cultivo más importante seguido de las habas y las lentejas ocupando una extensión total en el mundo de 7,405,000 Ha; actualmente los principales países productores son: India, Turquía, Paquistán, México, Irán, Etiopía, España, Italia y América Central.

España es el principal importador de garbanzos de la Unión Europea. Su cultivo en España se centra en Andalucía, Extremadura y las dos Castillas (C.-León y C. La Mancha) (Guerrero, 1984; Gordillo, 1991).

1.2.1.6. HARINA DE GARBANZO

A partir de la molienda del grano entero y descascarado se obtiene una harina de origen vegetal que desde el punto de vista nutricional es un alimento rico en proteínas, hidratos de carbono, fibras, minerales y vitaminas. La harina de garbanzo se suele mezclar con harina blanca para elaboración de pan, o bien se emplea como ingrediente en productos de confitería (Infoagro.com.mx).

Tabla 2. Composición de harina de garbanzo

<i>Composición de harina de garbanzo en 100g de sustancia.</i>	
Componente	(%)
Humedad	10.2
Proteína	13
Grasa	4.7
Carbohidratos	67.2
Calcio	56.3
Fibra cruda	3.3
Sodio (mg)	12.4
Hierro (mg)	7.2
Valor energético (Kcal)	359.5

Fuente: Infoagro.com.mx

1.2.2. LENTEJA

Nombre científico: *Lens culinaris*.

1.2.2.1. DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN FÍSICA

Es una planta anual herbácea que pertenece a la familia de las Papilionáceas. Necesitan de un clima templado, mide de 15 a 75 cm de altura con tallo corto, débil y muy ramificado. Hojas paripinnadas, con zarcillos, folíolos pequeños ovales sin peciolo alargados. Las flores pueden estar solas o en racimos, pueden ser blancas, rosas, rojas o violetas, etc. Las vainas son lisas, comprimidas de entre 1.5 y 2 cm de longitud; conteniendo 2 semillas aplanadas de medio centímetro aproximadamente (Aykroyd & Doughty, 1964; Guerrero, 1984; Kay, 1979).

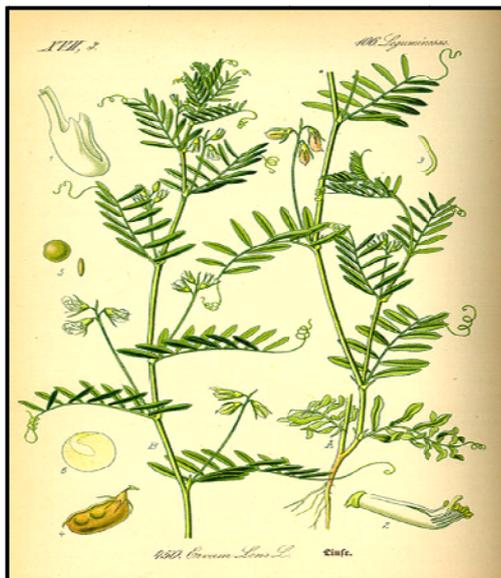


Fig. 7. Planta de lenteja (www.legumex.com)

1.2.2.2. ORIGEN:

Esta leguminosa se originó en Asia menor, desde donde se extendió rápidamente por los países de la cuenca mediterránea. Actualmente es una planta muy cultivada en todas las regiones templadas, ya que resulta fácil de cosechar, favorece la regeneración de los terrenos al alternar su cultivo con el de los cereales y es rica en energía, barata, de fácil conservación

y capaz de combinar con todo tipo de alimentos, se utiliza como forraje en estado verde y la paja también se utiliza con buen resultado, cuando las semillas están completamente maduras estas son destinadas a consumo humano. Se considera, generalmente, que las variedades pequeñas, pardas y rojizas, tienen mejor sabor que las variedades grandes amarillas (Aykroyd & Doughty, 1964; Guerrero, 1984; <http://www.consumer.es>).

1.2.2.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Tabla 3. Composición química de la lenteja

Valor nutricional de la lenteja en 100 g de sustancia	
Contenido energético De los comestibles digestibles KJ:1.337 De los 100g de porción comestible Kcal: 315	
Componente	(g)
Agua	9.3
Proteína	23.5
Grasa	1.4
Carbohidratos	52
Fibra	10.6
Sales minerales	3.2

Fuente: Kraut, S.F. (1991)

1.2.2.4. VARIEDADES

Según Mateo Box (Guerrero, 1984) las variedades de lenteja se clasifican de la siguiente manera:

- **Vulgaris:** También conocida como "lentejón" o "lenteja de la reina", es la más grande de todas, caracterizada por sus semillas de color verde amarillento uniforme o con un ligero jaspeado verde oscuro y por sus cotiledones amarillo glauco.



Fig. 8. Lentija Vulgaris (<http://www.google.com.mx>)

- Variabilis: Se caracteriza por sus semillas de color pardo rojizo uniforme, con los cotiledones rojo anaranjado (lenteja rojiza).



Fig. 9. Lentija Variabilis (<http://www.google.com.mx>)

- Dupuyensis: Se caracteriza por vainas con manchas de color violáceo antes de la madurez, semillas de 4 a 5mm de diámetro, manchadas de azul sobre el fondo verde oliva, con jaspeado verde amarillento y con unos cotiledones glauco amarillento (lenteja francesa) (Guerrero, 1984).



Fig. 10. Lenteja Dupuyensis (<http://www.google.com.mx>)

1.2.2.5. PAÍSES PRODUCTORES

La producción mundial de lenteja asciende a 3,850,000 toneladas, destacándose como principales productores: India (29 %), Canadá (24.5 %), Turquía (14.5 %), EUA (4 %) y China (3.9 %). Todos ellos representan el 81 % de la producción mundial de lenteja (Aykroyd & J. Doughty, 1964; Guerrero 1984).

Canadá y Turquía son los principales exportadores de lenteja del mundo. Durante el año 2004, Canadá y Turquía exportaron 370,000 y 217,000 toneladas respectivamente. En conjunto, lo exportado por estos dos países represente el 60 % del volumen total exportado a nivel mundial (www.sagpya.mecon.gov.ar).

1.2.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS EN RELACIÓN A LA MOLIENDA.

Los sólidos al estar formados por un conjunto de partículas individuales van a presentar un comportamiento que depende de las propiedades de tales partículas como lo son la dureza, contenido de grasa así como tamaño y forma. A continuación se detallan algunas de estas propiedades.

1.2.3.1. DUREZA

Conocer la dureza de los productos es importante para la selección de los equipos. La dureza está relacionada con el módulo de la elasticidad; los materiales duros pueden ser quebradizos y fracturarse rápidamente, en cuanto se supere el límite elástico y deformarse antes de fracturarse. Estos comportamientos influyen en la mayor o menor dificultad de trituración y en la energía requerida para ello.

Los productos más duros son difíciles de triturar. Se necesita más energía y tiempos más largos de residencia en la zona de acción lo que puede requerir:

- Reducir la producción de un molino
- El empleo de un molino con mayor capacidad para una determinada producción (Brennan, 1998).

1.2.3.2. CONTENIDOS EN GRASA Y ACEITES

Ciertos materiales con altos contenidos en grasas o aceites exigen trabajar a temperaturas muy bajas que transformen el producto en uno altamente friable. De no ser así el equipo no podrá funcionar por empastamiento. En base a una investigación enfocada a la elaboración de alimentos para peces se recomienda que el nivel de grasa contenido en el material a moler no exceda del 6 % para evitar posibles tapaduras en los orificios de las mallas en los molinos de martillo (Bortone, 2007).

De acuerdo a la composición química, el garbanzo contiene una mayor cantidad de grasa en comparación con la lenteja, con un contenido de 3.4 %; mientras que la lenteja, de 1.4 %; sin embargo, estos contenidos no representan una posibilidad de empastamiento en el equipo.

1.2.3.3. TAMAÑO Y FORMA

Los materiales cuyas geometrías son similares presentan un fácil manejo y se adecuan mejor a altas velocidades durante las operaciones mecanizadas. Además, cuanto más uniforme sea la geometría de la materia prima menos desperdicios se generan durante la operación.

La uniformidad de tamaño y forma es de suma importancia para la mayor parte de las operaciones y procesos. El control del proceso para obtener productos de tamaño uniforme es más sencillo cuando se parte de un material homogéneo.

La forma del garbanzo se asemeja a una esfera, sin embargo algunos defectos geométricos como abultamientos y depresiones provocan que se aleje de la esfericidad complicando la operación de molienda. En el caso de la lenteja presenta una forma circular de poco espesor.

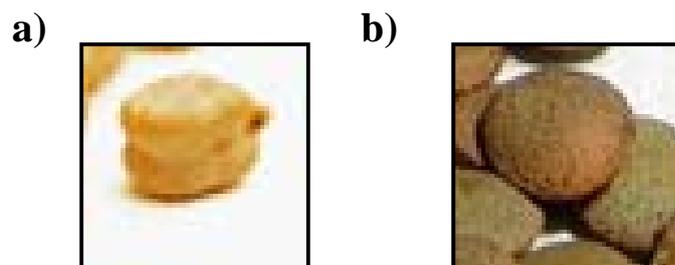


Fig. 11. Forma geométrica a) Garbanzo b) Lenteja

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA EXPERIMENTA

2.1. PROBLEMA

Evaluar la predicción de las leyes de consumo de potencia propuesta por Rittinger y Bond durante la molienda de dos materiales alimenticios: garbanzo (*Cicer arietinum*) y lenteja (*Lens culinaris*).

2.2. OBJETIVO GENERAL

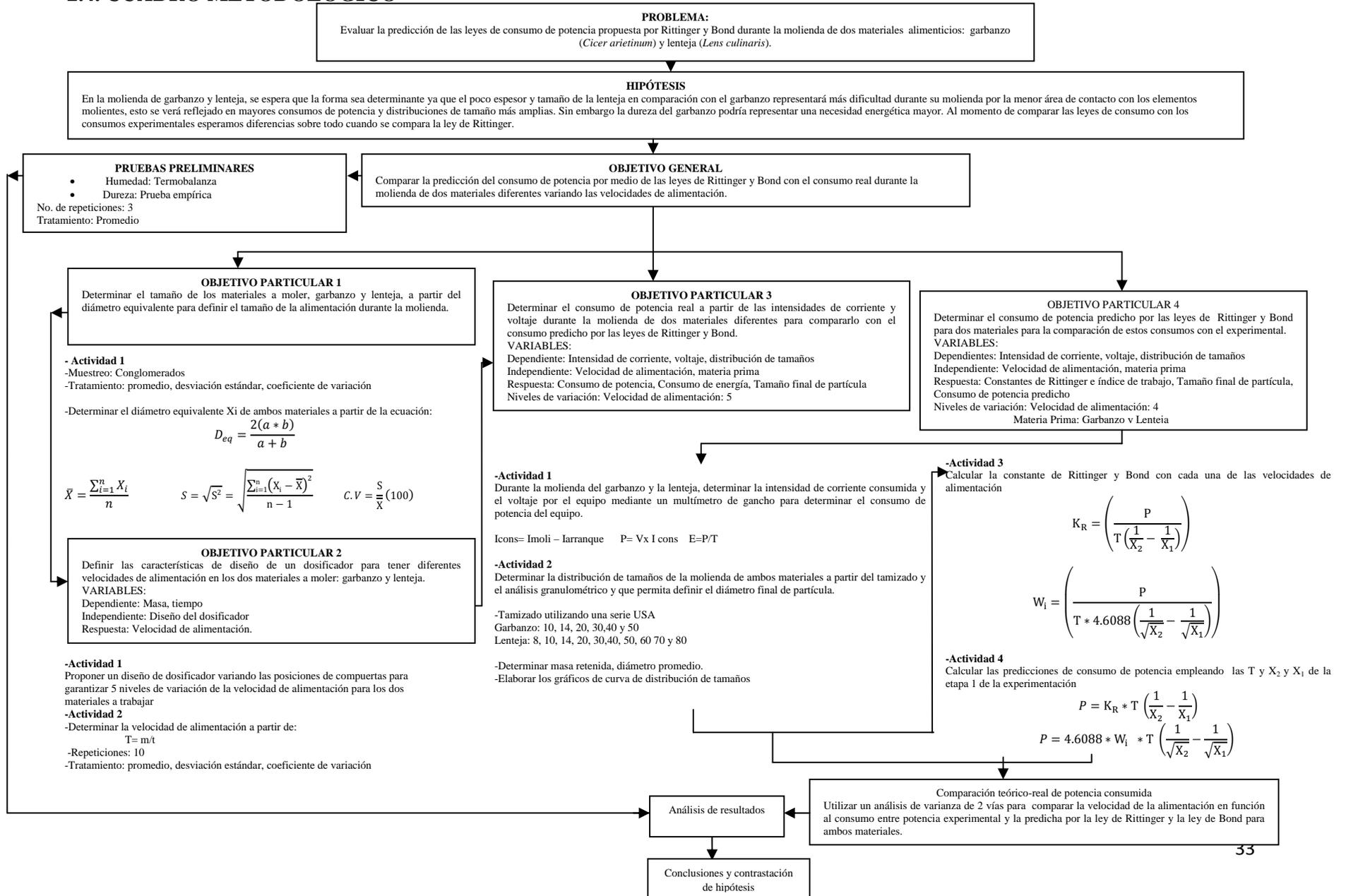
Comparar la predicción del consumo de potencia por medio de las leyes de Rittinger y Bond con el consumo real durante la molienda de dos materiales diferentes variando las velocidades de alimentación.

2.3. HIPÓTESIS

En la molienda de garbanzo y lenteja, se espera que la forma sea determinante ya que el poco espesor y tamaño de la lenteja en comparación con el garbanzo representará más dificultad durante su molienda por la menor área de contacto con los elementos molientes, esto se verá reflejado en mayores consumos de potencia y distribuciones de tamaño más amplias. Sin embargo la dureza del garbanzo podría representar una necesidad energética mayor. Al momento de comparar las leyes de consumo con los consumos reales esperamos diferencias sobre todo cuando se compara el consumo real con lo predicho por la ley de Rittinger.

A continuación se muestra la secuencia metodológica para cumplir con el objetivo general así como los objetivos particulares planteados en el presente trabajo.

2.4. CUADRO METODOLÓGICO



2.5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A continuación se muestran las pruebas preliminares (humedad y dureza) que se le determinaron al garbanzo y lenteja.

2.5.1. HUMEDAD

Se realizó una prueba preliminar para determinar el contenido de humedad con una termobalanza OHAUS modelo MB45 a 90°C durante 120 minutos, realizándose por triplicado. Se hizo un promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.



Fig. 12. Determinación de humedad por termobalanza

2.5.2. DUREZA

La dureza de ambos materiales se determinó mediante una prueba empírica; en la cual se cuantificó el porcentaje de muestra fracturada en función a un peso fijo (15.735 kg). La prueba se realizó por triplicado.



Fig. 13. Determinación de dureza

La metodología experimental se dividió en dos etapas. La primera se realizó con la finalidad de determinar la potencia real durante la molienda de dos materiales. La segunda etapa se realizó para el cálculo teórico a partir de las constantes de las leyes de Rittinger y Bond, utilizando como unidades experimentales al garbanzo (*Cicer arietinum*), la variedad que se utilizó fue Kabuli y para lenteja (*Lens culinaris*), Variabilis. Cabe comentar que a partir de este punto a la potencia calculada a partir de las constantes determinadas en la etapa 2 se le nombrará como potencia teórica.

A continuación se presenta la metodología empleada para el cumplimiento de la etapa 1.

2.6. ETAPA 1

Como se mencionó anteriormente esta etapa se utilizó para determinar el cálculo del consumo de potencia real dividiéndose en tres objetivos como se muestran a continuación:

2.6.1. OBJETIVO PARTICULAR 1

Determinar el tamaño de dos materiales a moler, garbanzo y lenteja, a partir del diámetro equivalente para definir el tamaño de la alimentación durante la molienda.

Para cubrir este objetivo fue necesario realizar un muestreo por conglomerados teniendo una muestra inicial de 100g para ambos materiales (garbanzo y lenteja) la cual consistió en subdividir la muestra en cuatro partes iguales para así tomar una de éstas de forma aleatoria, con la finalidad de obtener una muestra representativa.

2.6.1.1 DIÁMETRO EQUIVALENTE

Una vez obtenida la muestra se procedió a tomar medidas de la circunferencia mayor y menor para garbanzo y lenteja con un vernier, con estos datos se calculó el diámetro equivalente por medio de la ecuación 6 (Geankoplis, 2006), tomando en cuenta 300 unidades experimentales.

Una vez tomadas las medidas se sacó un promedio de ambas circunferencias en los dos materiales (garbanzo y lenteja), de este promedio se obtuvo una desviación estándar, S y el coeficiente de variación, CV para corroborar que los promedios obtenidos fueran confiables y así finalmente sustituir los valores de las medias en la ecuación (6).

$$D_{eq} = \frac{2(a*b)}{a+b} \quad (6)$$

Donde:

D_{eq} = diámetro equivalente (mm).

a = circunferencia mayor de la materia prima (mm).

b = circunferencia menor de la materia prima (mm).

2.6.2. OBJETIVO PARTICULAR 2

Definir las características de diseño de un dosificador para tener diferentes velocidades de alimentación en los dos materiales a moler: garbanzo y lenteja.

VARIABLES:

Dependiente: Masa, tiempo.

Independiente: Diseño del dosificador.

Respuesta: Velocidad de alimentación.

2.6.2.1 DISEÑO DE DOSIFICADOR

Se propuso el diseño de dosificador en el que se variaron cinco posiciones diferentes de abertura de la compuerta para ambos materiales (tabla 4).

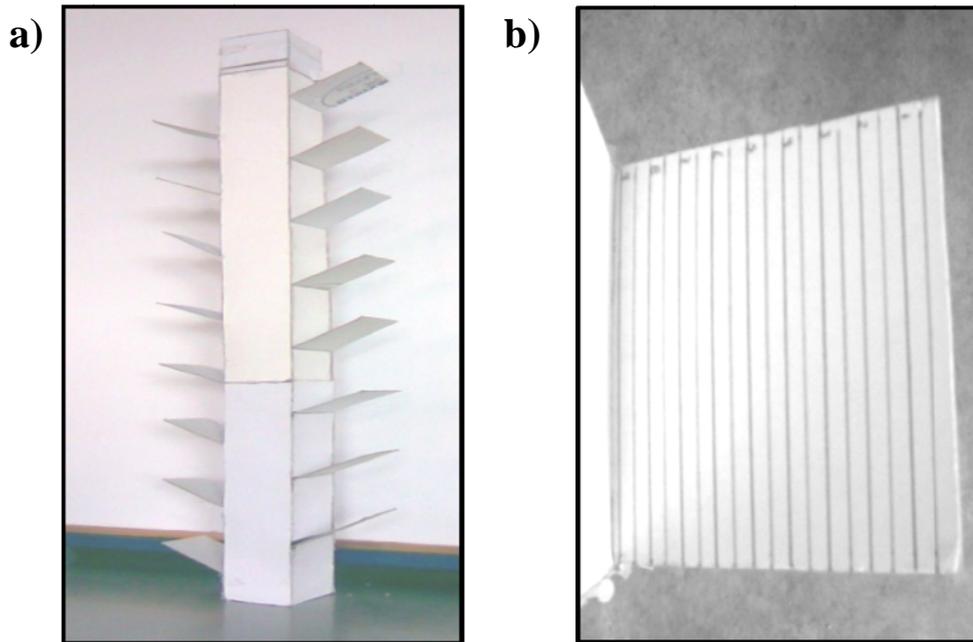


Fig. 14. a) Dosificador b) Compuerta

Tabla 4. Aberturas de compuerta del dosificador para ambos materiales.

ETAPA 1	
Abertura (cm)	
Garbanzo	Lenteja
1.5	1.5
2.5	2.5
3.5	3.5
4.5	4.5
5.5	5.5

2.6.2.2. DETERMINACIÓN DE VELOCIDADES DE ALIMENTACIÓN

Para determinar las velocidades de alimentación se tomó el tiempo (mediante el uso de un cronómetro) que tarda en pasar el material por el dosificador realizando 10 repeticiones para las diferentes aberturas (ver tabla 4) para posteriormente sacar un promedio.

La velocidad de alimentación se obtuvo con la ecuación 7:

$$T = \frac{m}{t} \quad (7)$$

Donde:

m = cantidad de muestra (g).

t = tiempo que tarda en salir la muestra por el dosificador (s).

2.6.3. OBJETIVO PARTICULAR 3

Determinar el consumo de potencia real a partir de la determinación de la intensidad de corriente y voltaje durante la molienda de dos materiales diferentes para compararlo con el consumo predicho por las leyes de Rittinger y Bond.

VARIABLES

Dependientes: Intensidad de corriente, voltaje, distribución de tamaños.

Independiente: Velocidad de alimentación, materia prima

Respuesta: Consumo de potencia, consumo de energía, tamaño final de partícula

Niveles de variación: Velocidad de alimentación: 5

Materia Prima: garbanzo y lenteja

Factores constantes: Criba de 1 mm en la salida del molino

Masa de alimentación de 150g

2.6.3.1. MOLIENDA Y DETERMINACIÓN DEL CONSUMO REAL DE POTENCIA

La experimentación se llevó a cabo en el Laboratorio Experimental Multidisciplinario de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM en el área de Ingeniería en Alimentos. Se empleó un molino de martillos móviles (figura 15) el cual contiene un rotor horizontal que gira a alta velocidad en el interior de la carcasa, este rotor cuenta con tres juegos de nueve martillos colgantes en forma de barras con una longitud de 9 x 1.5 cm (figura 16). El material se introduce por la parte superior, el cual es lanzado por los martillos contra la carcasa y es triturado. El material es reducido por la fuerza de impacto que se le aplica y lanzado contra la criba de forma circular que rodea al eje. La salida del producto por la criba sucede cuando alcance este diámetro o menos (se mantuvo constante una abertura de 1mm) y los pequeños fragmentos son impulsados hacia la parte inferior del molino.

La molienda se efectuó con una alimentación de 150 g por corrida; las velocidades de alimentación (T) se variaron como se indica en la tabla 4. Durante la molienda se aseguró un mínimo del 80 % de producto molido en relación con la alimentación.

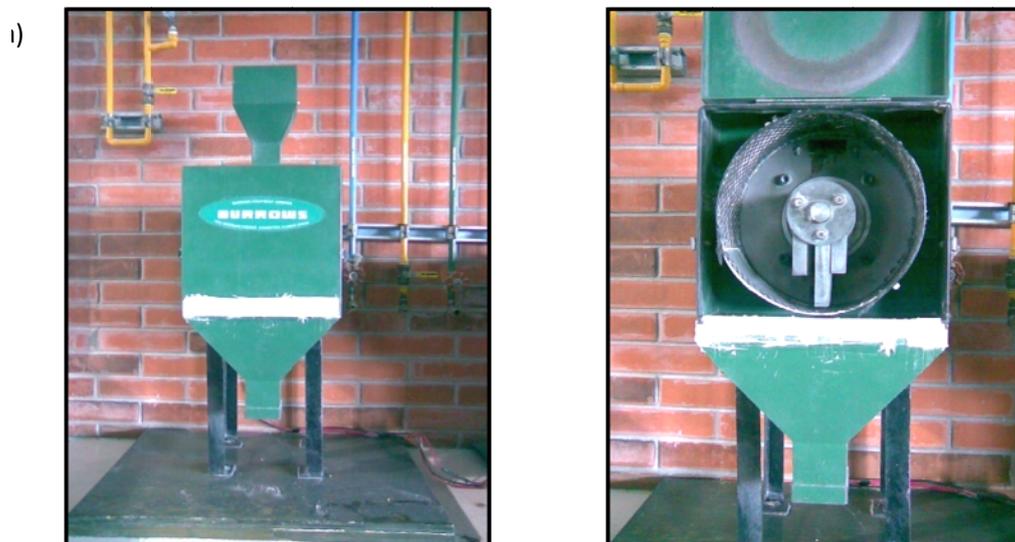


Fig. 15. a) Imagen externa b) Imagen interna del Molino de Martillos

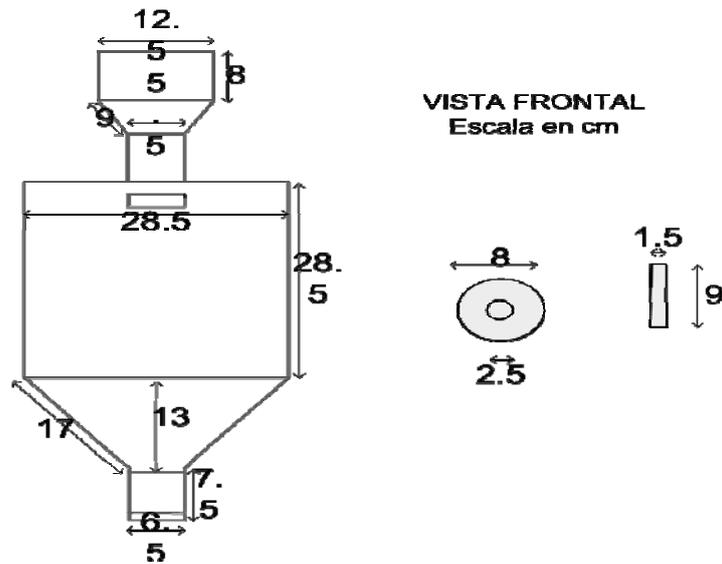


Fig. 16. Dimensiones frontales del equipo, del eje y de los martillos del molino.

Se determinó el voltaje y las intensidades de corriente con un multímetro de gancho (figura 17) para obtener la intensidad al arranque sin muestra y durante la molienda. La potencia (P) gastada por el equipo (Geankoplis, 2006) se obtuvo de la resta de las intensidades multiplicada por el voltaje, ecuación 8. La intensidad durante la molienda se determinó a partir del comportamiento gráfico de la misma desde el arranque hasta el término de la molienda. De esta forma se obtuvo una intensidad constante durante la zona de molienda.

$$P = V \cdot I \quad (8)$$

Donde:

P = potencia necesaria para llevar a cabo la molienda (Watts).

V = voltaje de la corriente eléctrica (Volts).

I = intensidad de corriente eléctrica (Ampers).



Fig. 17. Multímetro de Gancho

2.6.3.2. TAMIZADO

La muestra resultante de la molienda se tamizó en un equipo para agitación Ro-tap empleando una serie USA con los siguientes números de mallas 10, 14, 20, 30, 40 y 50 para garbanzo mientras que para lenteja se emplearon las mallas: 8, 10, 14, 20, 30, 40, 50, 60, 70 y 80.

El tamizado se llevó a cabo colocando el juego de tamices ordenados de arriba abajo por orden decreciente de abertura de malla, el producto a analizar se añadió sobre el primer tamiz, es decir aquel de abertura de malla mayor para después someterse a un conjunto de movimientos vibratorios. Se realizó con 100 g de muestra molida para cada corrida, con una agitación de 10 minutos; realizándolo por triplicado.



Fig. 18. a) Equipo de agitación Ro-tap, b) Tamiz

Con los datos obtenidos y el análisis granulométrico se construyeron gráficos diferenciales para poder visualizar adecuadamente la distribución de tamaños existente en la muestra.

2.7. ETAPA 2

La segunda etapa se realizó para el cálculo teórico de la potencia a partir de las constantes de las leyes de Rittinger y Bond, utilizando como unidades experimentales al garbanzo (*Cicer arietinum*) y lenteja (*Lens culinaris*). Se siguió la misma metodología de la etapa uno para el cálculo del diámetro equivalente, velocidades de alimentación, consumo de potencias reales, molienda y tamizado.

Se empleó el mismo dosificador de la etapa 1 con una variación en las aberturas (tabla 5).

Tabla 5. Aberturas de compuerta de dosificador para ambos materiales

ETAPA 2	
Abertura (cm)	
Garbanzo	Lenteja
1.5	1
2	1.5
2.5	2
3	2.5
3.5	3

Una vez realizada la metodología empleada en la etapa 1 con la variación antes mencionada se llevó a cabo el objetivo cuatro para el cálculo de la potencia teórica por medio de las constantes de Rittinger y Bond y así finalmente hacer una comparación entre potencias teóricas experimentales.

2.7.2. OBJETIVO PARTICULAR 4

Calcular el consumo de potencia predicho por las leyes de Rittinger y Bond para dos materiales para la comparación de estos con el consumo de potencia real.

VARIABLES:

Dependientes: Intensidad de corriente, voltaje, distribución de tamaños

Independiente: Velocidad de alimentación, materia prima

Respuesta: Constantes de Rittinger e Índice de trabajo, tamaño final de partícula, consumo de potencia predicho

Niveles de variación: Velocidad de alimentación: 5 niveles

2.7.2.1. DETERMINACIÓN DE CONSTANTES

El valor de X_2 (diámetro final de la partícula) fue calculado con el diámetro sauter (tamaño medio de las partículas) a partir del análisis granulométrico, utilizando la ecuación 9.

$$D_s = \frac{1}{\left(\sum \frac{X_i}{D_{pi}}\right)} \quad (9)$$

Donde:

D_s = diámetro sauter (mm).

X_i = fracción masa.

D_{pi} = diámetro promedio (mm).

Las constantes de Rittinger y Bond se calcularon a partir del despeje de las ecuaciones 2 y 5 respectivamente, como se muestra a continuación. Cabe comentar que se consideró que el 80 % del producto pasó por la malla de 1mm, de aquí que el valor de la ecuación 5 cambia de 1.46 a 4.6088.

$$K_R = \left(\frac{P}{T \left(\frac{1}{X_2} - \frac{1}{X_1} \right)} \right) \quad \text{Rittinger} \quad (10)$$

$$W_i = \left(\frac{P}{T * 4.6088 \left(\frac{1}{\sqrt{X_2}} - \frac{1}{\sqrt{X_1}} \right)} \right) \quad \text{Bond} \quad (11)$$

2.7.2.2. PREDICCIÓN DE CONSUMO DE POTENCIA

Una vez obtenidos los valores de las constantes de Rittinger y de Bond se realiza el despeje de la potencia de las ecuaciones 10 y 11 obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$P = K_R * T \left(\frac{1}{X_2} - \frac{1}{X_1} \right) \quad \text{Rittinger} \quad (12)$$

$$P = 4.6088 * W_i * T \left(\frac{1}{\sqrt{X_2}} - \frac{1}{\sqrt{X_1}} \right) \text{Bond} \quad (13)$$

Los datos de T, X_2 y X_1 se tomaron de la etapa 1; mientras que las constantes de Rittinger y Bond se obtuvieron durante la etapa 2. Una vez calculada la potencia se realizó una comparación entre potencia teórica y real.

Se aplicó un análisis de varianza de una vía con prueba de Tukey al 95 % de confianza, para la comparación de constantes entre velocidades de alimentación para cada una de las leguminosas y a su vez se utilizó un análisis de varianza de dos vías para la comparación entre potencia real y la predicha por la ley de Rittinger y la ley de Bond para ambos materiales.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. PRUEBAS PRELIMINARES

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la prueba de humedad por termobalanza en ambos materiales.

3.1.1. HUMEDAD

Tabla 6. Porcentaje de Humedad para Garbanzo

Repetición	% Humedad
1	9.47
2	9.32
3	9.23
Promedio	9.34
S	0.12
CV (%)	1.29

Como muestra la tabla el contenido de humedad obtenido por termobalanza fue de 9.34 % mientras que el que se reporta bibliográficamente es de 11 %, esta diferencia se atribuye a condiciones de proceso previas a las que fue sometido.

Tabla 7. Porcentaje de Humedad para Lenteja

Repetición	% Humedad
1	9.45
2	9.66
3	9.46
Promedio	9.52
S	0.12
CV (%)	1.24

Al comparar el porcentaje de humedad obtenido durante la experimentación, 9.52 % con respecto al teórico, 9.3%, la diferencia fue mínima.

Estos contenidos de humedad no representaron problemas de aglomeración durante el proceso, confirmando lo explicado en los antecedentes.

3.1.2. DUREZA

En la tabla 8 se muestran los resultados de la prueba empírica que se utilizó para definir de manera cualitativa la dureza de los materiales y compararla entre ellos.

En ella se puede observar que con el peso utilizado, 15.735 kg, el garbanzo no se fracturó mientras que la lenteja sí, con un promedio de 5.5 % de materia fracturada. Este resultado muestra que el garbanzo tiene más dureza y como se verá después fue determinante en los resultados.

Tabla 8. Resultados de gramos de material fracturado durante la prueba empírica para dureza.

Materia prima	Repetición	Materia fracturada (g)	Materia sin fracturar (g)
Garbanzo	1	-----	7.91
	2	-----	8.46
	3	-----	8.08
Lenteja	1	0.20	3.24
	2	0.15	3.91
	3	0.28	3.75

A continuación se presentan los resultados de la etapa uno la cual se utilizó para obtener el consumo real de potencia.

3.2 ETAPA 1

3.2.1. DETERMINACIÓN DE DIÁMETRO EQUIVALENTE

Los resultados obtenidos en la etapa uno para ambas leguminosas se presentan en la tabla 9 y 10, para garbanzo y lenteja respectivamente.

Tabla 9. Medidas de tendencia central para diámetro equivalente para Garbanzo

	ETAPA 1	
	<i>CIRCUNFERENCIA MAYOR</i>	<i>CIRCUNFERENCIA MENOR</i>
Media (in)	0.3927	0.3043
Desviación Estándar	0.0222	0.0159
Coefficiente de variación (%)	5.6640	5.2502
Diámetro equivalente (mm)	8.9204	

Tabla 10. Medidas de tendencia central para diámetro equivalente para Lenteja

	ETAPA 1	
	<i>CIRCUNFERENCIA MAYOR</i>	<i>CIRCUNFERENCIA MENOR</i>
Media (in)	0.1907	0.1824
Desviación Estándar	0.0135	0.0157
Coefficiente de variación (%)	7.1145	8.6531
Diámetro equivalente(mm)	4.7340	

El diámetro equivalente nos ayudó a determinar el tamaño inicial de la partícula para posteriores cálculos; como se puede observar en las tablas 9 y 10, como era de esperarse, el garbanzo mostró un mayor diámetro equivalente con respecto a la lenteja y presenta un coeficiente menor con respecto a la misma, por lo tanto una menor variación entre unidades experimentales.

3.2.2. DETERMINACIÓN DE VELOCIDADES DE ALIMENTACIÓN

Enseguida se presentan los tiempos obtenidos conforme a la abertura del dosificador realizando un promedio; lo cual permitió determinar la velocidad de alimentación para cada una de las aberturas en ambos materiales. En la tabla 11 se presentan los resultados para el garbanzo y la tabla 12, los de lenteja.

Tabla 11. Tiempos (s) para determinar las velocidades de alimentación para garbanzo.

Abertura(cm)	ETAPA 1				
	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
1	5.50	4.35	4.05	3.87	3.05
2	5.23	4.31	4.10	3.85	3.10
3	6.06	4.48	4.14	3.40	3.02
4	5.28	4.30	4.02	3.78	3.02
5	5.45	4.33	4.10	3.78	3.02
6	5.38	4.38	3.95	3.86	3.17
7	5.32	4.23	3.94	4.01	3.00
8	5.28	4.29	3.98	4.02	2.96
9	5.28	4.35	3.94	4.15	3.10
10	5.34	4.26	4.00	3.97	3.11
X	5.41	4.32	4.02	3.86	3.05
S	0.24	0.07	0.07	0.20	0.06
CV (%)	4.48	1.60	1.81	5.22	2.07
T (Kg/ h)	66.5	83.2	89.5	93.0	117.8

De acuerdo a las velocidades de alimentación obtenidas para el garbanzo, en el caso de las aberturas 3.5 y 4.5, se encontró que no presentaron diferencia entre ellas, sin embargo las tres restantes la diferencia se hace más evidente, debido a que la forma y tamaño propio del material influían en los tiempos en que recorría el material dentro del dosificador, por lo cual podemos atribuir esta variación a un difícil control del dosificador.

Tabla 12. Tiempos (s) para determinar las velocidades de alimentación para lenteja.

Abertura (cm)	ETAPA 1				
	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
1	11.39	7.2	6.33	5.74	4.67
2	11.77	7.41	6.32	5.54	4.58
3	11.20	7.2	6.35	5.62	4.48
4	11.15	7.23	6.40	5.37	4.49
5	11.34	7.17	6.38	5.64	4.70
6	11.25	7.12	6.36	5.39	4.70
7	11.46	7.46	6.43	5.44	4.54
8	11.12	7.10	6.40	5.68	4.52
9	11.44	7.35	6.39	5.58	4.65
10	11.36	7.15	6.34	5.73	4.40
X	11.34	7.23	6.37	5.57	4.57
S	0.19	0.12	0.03	0.13	0.10
CV (%)	1.67	1.72	0.55	2.42	2.27
T (Kg/ h)	47.6	74.6	84.7	96.9	118.1

Como era de esperarse, el tiempo que tardó el material en pasar por el dosificador fue disminuyendo conforme se aumentaba la abertura de la compuerta. La diferencia entre velocidades de alimentación para el caso de lenteja resultó más satisfactoria en comparación con las del garbanzo por lo cual se hace notar que se tuvo un mejor control del dosificador para lenteja.

En el siguiente apartado se muestran los resultados del análisis granulométrico para ambos materiales.

3.2.3. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

3.2.3.1. GARBANZO

Se realizó el análisis granulométrico y se elaboraron los gráficos diferenciales para ambos materiales de acuerdo a su velocidad de alimentación, figuras 19 y 20 respectivamente.

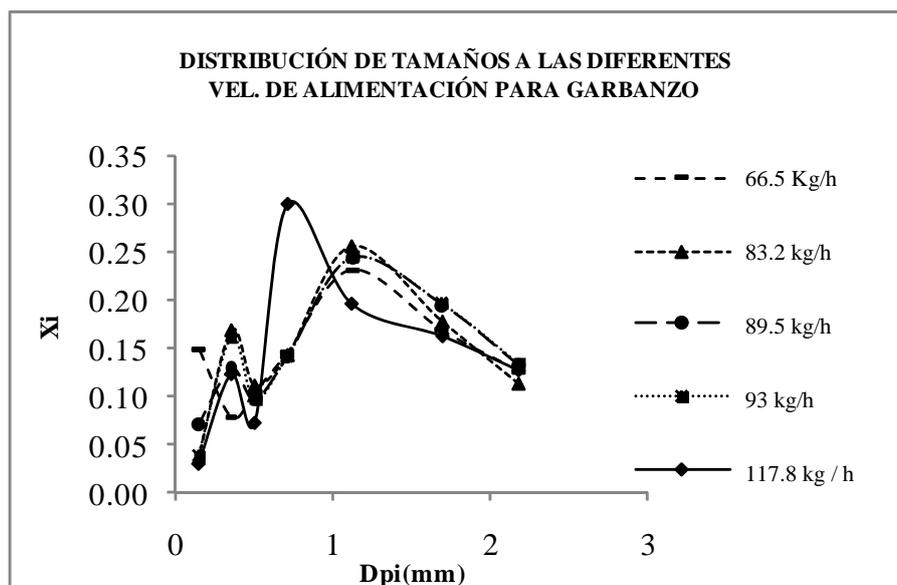


Fig. 19. Gráfica de distribución de tamaños a las diferentes velocidades de alimentación utilizadas durante la molienda de garbanzo.

Como puede observarse en el gráfico comparativo de las diferentes velocidades de alimentación para garbanzo, la presencia de dos picos se atribuye a errores que se tuvieron durante la experimentación tales como el pesado de las muestras en las balanzas. La distribución de tamaño para las 4 primeras velocidades de alimentación es amplia con tendencia más a gruesos; para el caso de la velocidad de alimentación de 117.8 kg/h la distribución fue más homogénea con mayor producción de finos ya que al ser la abertura de mayor tamaño para el garbanzo permite la entrada rápida del material al equipo provocando que permanezca un mayor tiempo en la zona de molienda, por lo tanto se origina la producción de una mayor cantidad de finos.

Esta variación, aunque no se puede apreciar en el sauter medio, si se observa en el gráfico al tener una media poblacional más cercana al eje de las y's.

3.2.3.2. LENTEJA

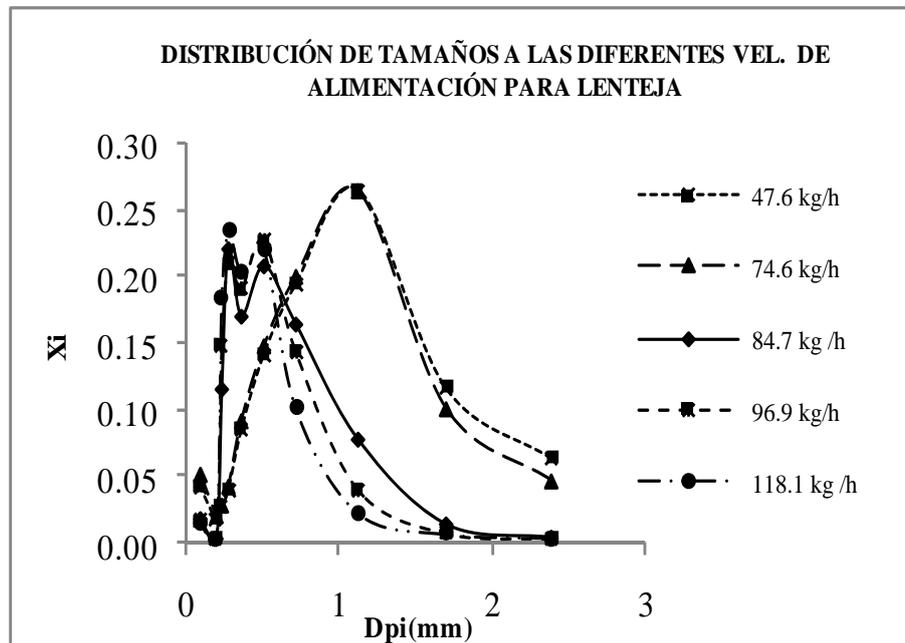


Fig. 20. Gráfico de distribución de tamaños para las diferentes velocidades de alimentación utilizadas durante la molienda de lenteja.

En los gráficos comparativos de lenteja se puede observar que a velocidades mayores se obtuvieron distribuciones con productos más finos en comparación con las menores, implicando que el producto permaneció más tiempo en la zona de molienda, esto se demuestra con los valores obtenidos de sauter en donde el diámetro final de la partícula es menor con respecto a las velocidades más altas.

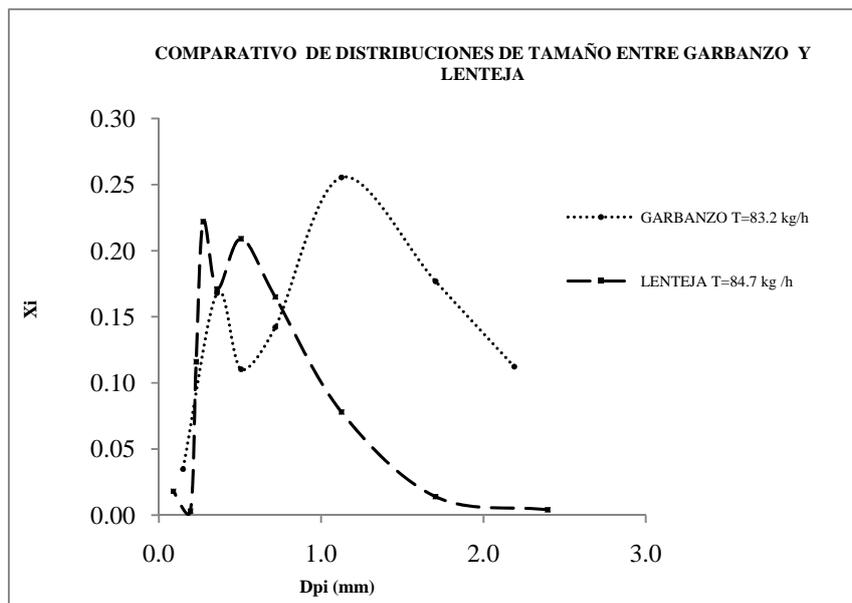


Fig. 21. Gráfica comparativa de distribuciones de tamaño entre Garbanzo y Lenteja

Al realizar una comparación de velocidades de alimentación similares entre garbanzo y lenteja se puede observar que la distribución de tamaños para garbanzo fue ligeramente más amplia con tendencia a ser más gruesa debido principalmente a la forma y tamaño en comparación con la lenteja, en donde se obtuvieron productos más finos debido a que hay un mayor número de unidades y por lo tanto una mayor área superficial de contacto. Como se comentó en los antecedentes la dureza del material implica más dificultad en la molienda para alcanzar un producto más fino; es decir, la entrega de energía al material debe ser superior.

3.2.4. DIÁMETRO SAUTER

Tabla 13. Diámetros sauter para Garbanzo

Garbanzo	
T (Kg/h)	Ds (mm)
66.492	0.6353
83.160	0.6361
89.496	0.6572
93.024	0.6497
117.828	0.7234

Como muestra la tabla 13 el diámetro sauter fue mayor en la última velocidad de alimentación, se hubiese esperado que este valor fuera menor ya que al emplear una velocidad de alimentación alta el material se recircula en la zona de molienda por lo tanto se tiene como resultado un producto más fino sin embargo, partiendo de la definición de sauter medio, considera una relación área/volumen y en ese sentido, esta fue mayor.

Tabla 14. Diámetros sauter para Lenteja

Lenteja	
T (Kg/h)	Ds (mm)
47.556	0.4913
74.592	0.4872
84.744	0.3813
96.876	0.3362
118.08	0.3305

A diferencia de los valores de sauter obtenidos en garbanzo, la lenteja mostró el comportamiento esperado, a mayor velocidad de alimentación menor diámetro de partícula final, considerando la relación área/volumen.

3.2.5. CONSUMOS DE POTENCIAS REALES

En la tabla 15 se presentan los resultados de consumo de potencia para ambos materiales que corresponden a la etapa 1. Como se ha comentado, esta etapa permitió obtener los consumos reales para posteriormente compararlos con consumos predichos.

Se esperaba que las intensidades de arranque a las diferentes velocidades de alimentación fueran constantes sin embargo se presentó una variación influyendo en la intensidad durante la molienda y por lo tanto en los resultados; esto se atribuye a que durante la molienda otros equipos estaban en operación lo cual pudo repercutir durante el funcionamiento del molino.

En el caso del garbanzo el resultado de potencia y energía disminuye conforme aumenta la velocidad de alimentación aunque se esperaba que el consumo de potencia aumentara debido a la recirculación del material en la zona de molienda, esto fue efecto del mal control de velocidades debido al control del dosificador durante el proceso de molienda, como se comentó con anterioridad.

La forma del garbanzo repercutió en gran medida en su desplazamiento por el dosificador durante las diferentes velocidades aunado a la poca diferencia lograda entre ellas, lo cual nos indica la importancia de este factor en la molienda y por lo tanto su control.

En contraste, en los consumos de potencia de la lenteja se observa una tendencia en donde a mayor velocidad mayor consumo.

Tabla 15. Consumos de potencia para garbanzo y lenteja etapa 1.

GARBANZO						LENTEJA				
Repetición	I _{Arranque} (A)	I _{Molienda} (A)	I _{constante} (A)	P (W)	Energía (W.h/kg)	I _{Arranque} (A)	I _{Molienda} (A)	I _{constante} (A)	P (W)	Energía (W.h/kg)
Abertura=1.5cm T=66.492 Kg/h V=121.6 V						Abertura=1.5cm T=47.55Kg/h V=120.8 V				
1	1.860	3.501	1.641	199.546	3.001	1.89	2.812	0.922	111.394	2.342
2	1.870	3.579	1.709	207.790	3.125	2.34	3.094	0.754	91.103	1.915
3	1.890	3.591	1.701	204.764	3.080	1.89	2.641	0.751	90.772	1.908
promedio	1.873	3.557	1.684	204.033	3.069	2.04	2.849	0.809	97.756	2.055
Abertura=2.5cm T=83.16Kg/h V=121.6 V						Abertura=2.5cm T=74.59Kg/h V=120.8 V				
1	2.000	3.525	1.525	185.440	2.230	1.89	3.024	1.134	137.081	1.837
2	1.900	3.393	1.493	181.549	2.183	1.9	3.03	1.13	136.504	1.830
3	1.840	3.317	1.477	177.867	2.139	1.9	3.003	1.103	133.282	1.786
promedio	1.913	3.412	1.498	181.619	2.184	1.896	3.019	1.122	135.622	1.817
Abertura=3.5cm T=89.496Kg/h V=121.6 V						Abertura=3.5cm T=84.74Kg/h V=120.8 V				
1	1.940	3.395	1.455	176.867	1.976	1.97	3.953	1.983	239.645	2.828
2	2.210	3.560	1.350	164.160	1.834	1.9	3.710	1.810	218.725	2.581
3	2.200	3.567	1.367	166.203	1.857	1.89	3.753	1.863	225.050	2.655
promedio	2.117	3.507	1.390	169.077	1.889	1.92	3.805	1.885	227.807	2.688
Abertura=4.5cm T=93.024Kg/h V=121.6 V						Abertura=4.5cm T=96.87Kg/h V=120.8 V				
1	1.920	3.293	1.373	167.005	1.795	1.89	5.394	3.504	423.360	4.370
2	1.890	3.345	1.455	176.928	1.902	2.03	5.731	3.701	447.106	4.615
3	1.900	3.292	1.392	167.609	1.802	1.91	5.223	3.313	400.279	4.132
promedio	1.903	3.310	1.407	170.514	1.833	1.943	5.449	3.506	423.582	4.372
Abertura=5.5cm T=117.828Kg/h V=121.6 V						Abertura=5.5cm T=118.08Kg/h V=120.8 V				
1	1.900	3.215	1.315	159.928	1.357	1.87	5.690	3.820	461.493	3.908
2	1.880	3.186	1.306	158.810	1.348	1.92	5.629	3.709	448.117	3.795
3	1.840	3.057	1.217	146.563	1.244	1.89	5.644	3.754	453.483	3.840
promedio	1.873	3.153	1.280	155.100	1.316	1.893	5.654	3.761	454.364	3.847

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la etapa dos.

3.3. ETAPA 2

3.3.1. DIÁMETRO EQUIVALENTE

Los resultados obtenidos para ambas leguminosas para esta etapa, se presentan en la tabla 16 y 17, para garbanzo y lenteja respectivamente.

Tabla 16. Medidas de tendencia central para diámetro equivalente para garbanzo.

	ETAPA 2	
	<i>CIRCUNFERENCIA MAYOR</i>	<i>CIRCUNFERENCIA MENOR</i>
Media (in)	0.4111	0.3065
Desviación Estándar	0.0279	0.0188
Coefficiente de variación (%)	6.7869	6.1497
Diámetro equivalente (mm)	8.7096	

Tabla 17. Medidas de tendencia central para diámetro equivalente para lenteja.

	ETAPA 2	
	<i>CIRCUNFERENCIA MAYOR</i>	<i>CIRCUNFERENCIA MENOR</i>
Media (in)	0.1968	0.1825
Desviación Estándar	0.0077	0.0131
Coefficiente de variación (%)	3.9529	7.2155
Diámetro equivalente (mm)	4.8107	

La lenteja presenta una menor dispersión de datos con respecto a su media implicando una mayor homogeneidad entre unidades experimentales.

3.3.2. VELOCIDADES DE ALIMENTACIÓN.

En la tabla 18 y 19 se muestran los resultados obtenidos para garbanzo y lenteja respectivamente.

Tabla 18. Tiempos (s) para determinar las velocidades de alimentación para garbanzo.

	ETAPA 2				
Abertura(cm)	1.5	2	2.5	3	3.5
1	5.1	4.46	3.89	3.6	3.65
2	4.8	4.2	4.06	3.77	3.67
3	4.76	4.41	4	3.66	3.37
4	5.16	4.33	3.75	3.5	3.76
5	4.94	4.41	4.05	3.71	3.3
6	4.8	4.4	3.65	3.42	3.5
7	4.7	4.49	3.95	3.5	3.66
8	4.88	4.34	3.91	3.66	3.75
9	4.72	4.34	3.84	3.45	3.75
10	4.88	4.39	3.93	3.58	3.66
X	4.874	4.38	3.903	3.59	3.6
S	0.15	0.08	0.12	0.11	0.16
CV (%)	3.17	1.84	3.31	3.23	4.50
T (Kg/ h)	73.83	82.08	92.2	99.8	100.4

Tabla 19. Tiempos (s) para determinar las velocidades de alimentación para lenteja.

	ETAPA 2				
Abertura (cm)	1	1.5	2	2.5	3
1	5.7	5.36	4.41	3.86	4.24
2	5.72	5.29	4.67	4.01	3.95
3	5.6	5.15	4.58	4.17	3.88
4	6.11	5.43	4.64	4.26	3.83
5	5.95	5.43	4.7	4.15	3.8
6	5.89	5.4	4.52	4.35	4.1
7	6.06	5.45	4.44	4.27	3.92
8	6.04	5.37	4.67	4.37	4.1
9	6.04	5.33	4.56	4.44	3.73
10	6.36	5.31	4.58	4.57	4.17
X	5.94	5.352	4.57	4.24	3.97
S	0.22	0.08	0.09	0.20	0.17
CV (%)	3.81	1.66	2.14	4.89	4.31
T (Kg/ h)	60.5	67.8	78.5	84.2	90.6

Como se puede observar las velocidades de alimentación obtenidas en la etapa dos confirman lo comentado en la etapa uno, fue difícil el control de velocidad para asegurar diferentes velocidades de alimentación entre aberturas; sin embargo el diseño del dosificador fue la limitante resultando en un rango de diferencia muy pequeño sobre todo para garbanzo. Este resultado se confirma más tarde a partir del análisis estadístico.

3.3.3. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

3.3.3.1. GARBANZO

Se presentan los análisis diferenciales para etapa 2.

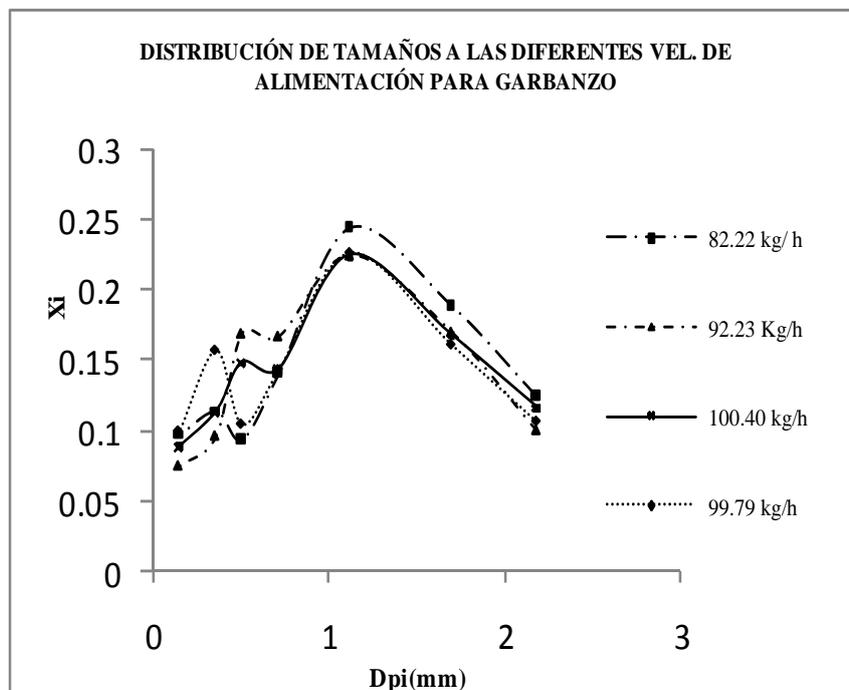


Fig. 22. Gráfico de distribución de tamaño a las diferentes velocidades de alimentación utilizadas durante la molienda de Garbanzo.

Se puede observar que la distribución de tamaños para el garbanzo fue amplia para las diferentes velocidades de alimentación aunque cabe destacar que entre las velocidades el comportamiento fue similar.

3.3.3.2. LENTEJA

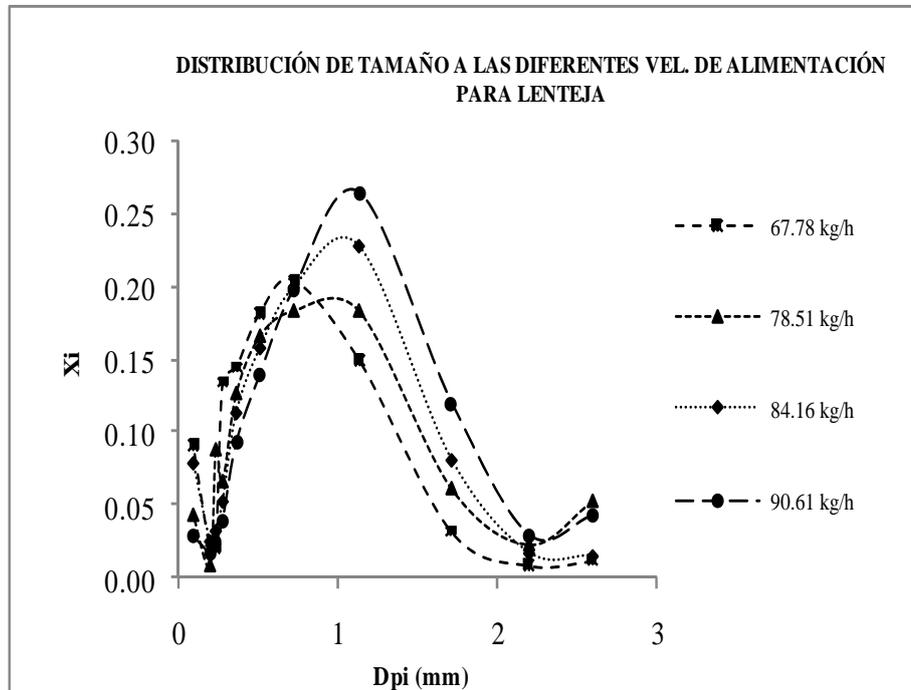


Fig. 23. Gráfico de distribución de tamaño a las diferentes velocidades de alimentación utilizadas durante la molienda de lenteja.

En la etapa 2 el comportamiento es similar entre velocidades al comparar las distribuciones de tamaño.

En los gráficos de distribuciones de tamaños que se muestran en las figuras 22 y 23 entre las dos leguminosas se observó mayor homogeneidad en la lenteja ya que las curvas de distribución de tamaños fueron más amplias en el garbanzo. Así mismo, los resultados demuestran que se obtuvieron productos más finos para la lenteja debido a que hay un mayor número de unidades experimentales por lo tanto se espera obtener un consumo de potencia mayor debido a la evidente recirculación del material en la zona de molienda.

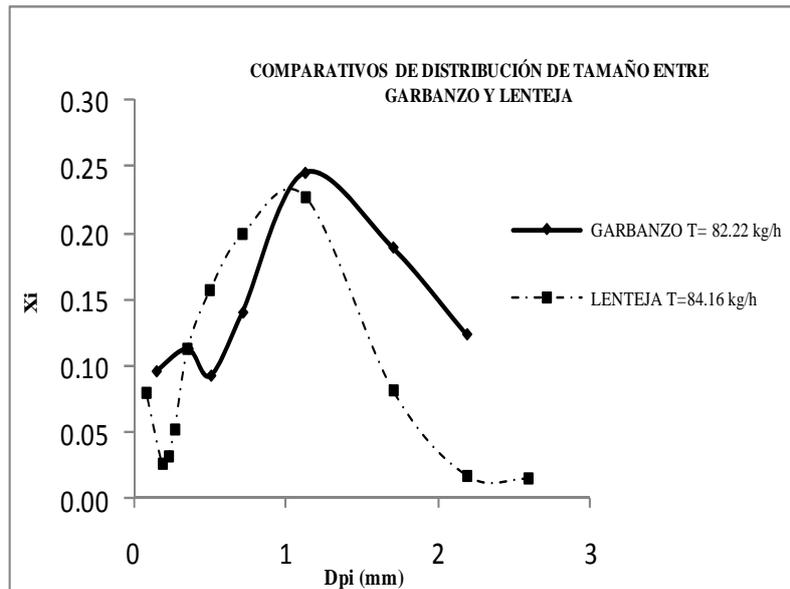


Fig. 24. Gráfica comparativa de distribución de tamaños entre Garbanzo y Lenteja.

En la figura 24 se puede apreciar de una manera más clara el comportamiento de distribución de tamaño que presentaron los materiales durante la molienda, ya que al comparar velocidades de alimentación similares entre ambos materiales; el garbanzo al ser de un tamaño mayor y presentar ciertas características propias del material como protuberancias, presentó una distribución ligeramente más amplia en comparación con la lenteja. Es clara la necesidad de una mayor potencia para alcanzar el mismo tamaño de la lenteja.

3.3.4. DIÁMETRO SAUTER

Tabla 20. Diámetros sauter para Garbanzo.

Garbanzo	
T (Kg/h)	Ds (mm)
82.224	0.5283
92.232	0.5953
99.792	0.5944
100.404	0.5443

Tabla 21. Diámetros sauter para Lenteja.

Lenteja	
T (Kg/h)	Ds (mm)
67.788	0.3433
78.516	0.3869
84.168	0.4138
90.612	0.5237

En la tabla 20 muestra que los resultados de diámetro sauter en garbanzo son similares para las diferentes velocidades de alimentación sin embargo para lenteja se aprecia que a una mayor velocidad de alimentación se obtiene como resultando un mayor diámetro final del producto, esto se debe a que se está obteniendo un producto más fino pero con mayor relación de área/volumen.

3.3.5. CONSUMOS DE POTENCIA PARA DETERMINAR CONSTANTES Y PREDECIR CONSUMOS DE POTENCIA.

En la tabla 22 se presentan los resultados obtenidos para el consumo de potencia durante la molienda de garbanzo y lenteja en la etapa 2.

En la tabla 23 se reporta el resumen con los promedios de potencia obtenidos y los valores de constantes para las dos leyes a partir de estos consumos experimentales.

Tabla 22. Consumos de potencia para Garbanzo y Lenteja etapa 2.

GARBANZO						LENTEJA				
Repetición	I _{Arranque} (Å)	I _{Molienda} (Å)	I _{constante} (Å)	P (W)	Energía (W.h/kg)	I _{Arranque} (Å)	I _{Molienda} (Å)	I _{constante} (Å)	P (W)	Energía (W.h/kg)
Abertura=2cm T=82.224Kg/h V=120 V						Abertura=1.5cm T=67.78Kg/h V=121.1 V				
1	2.060	4.755	2.695	323.400	3.933	2.18	3.84	1.66	201.026	2.965
2	1.880	4.334	2.454	294.480	3.581	2.07	3.728	1.658	200.783	2.961
3	1.880	3.283	1.403	168.360	2.048	1.86	3.697	1.837	222.460	3.281
Promedio	1.970	4.545	2.575	308.940	3.757	2.125	3.784	1.659	200.905	2.964
Abertura=2.5cm T=92.232Kg/h V=123 V						Abertura=2cm T=78.51Kg/h V=120 V				
1	2.050	3.787	1.737	213.651	2.316	1.880	3.322	1.442	173.040	2.203
2	1.860	3.546	1.686	207.378	2.248	1.890	3.400	1.510	181.200	2.307
3	1.830	3.004	1.174	144.402	1.566	1.920	3.610	1.690	202.800	2.582
Promedio	1.955	3.667	1.712	210.515	2.282	1.885	3.361	1.476	177.120	2.256
Abertura=3cm T=99.792Kg/h V=123 V						Abertura=2.5cm T=84.16Kg/h V=120 V				
1	1.860	3.023	1.163	143.049	1.433	1.880	3.517	1.637	196.440	2.333
2	2.030	3.885	1.855	228.165	2.286	1.870	3.566	1.696	203.520	2.418
3	1.860	3.752	1.892	232.716	2.332	1.870	3.487	1.617	194.040	2.305
Promedio	1.945	3.819	1.874	230.441	2.309	1.873	3.523	1.650	198.000	2.352
Abertura=3.5cm T=100.404Kg/h V=122 V						Abertura=3cm T=90.61Kg/h V=122 V				
1	1.860	3.281	1.421	173.362	1.726	1.94	3.443	1.503	183.366	2.023
2	2.030	3.207	1.177	143.594	1.430	1.91	3.402	1.492	182.024	2.008
3	1.860	3.100	1.240	151.280	1.506	1.89	3.595	1.705	208.010	2.295
Promedio	1.917	3.196	1.279	156.079	1.555	1.925	3.423	1.498	182.695	2.016

Como se puede ver en la tabla 22 las intensidades variaron ya que la molienda de estos materiales se realizó en diferentes días teniendo variación en voltajes para las diferentes velocidades de alimentación ya que algunos equipos estaban en operación lo cual pudo repercutir durante el funcionamiento del molino. Otro aspecto que se evidencia en la tabla es que en realidad el control de la velocidad no fue tan exacto sobre todo en el caso del garbanzo, de tal forma que repercutió en los resultados, observándose aumentos y disminuciones no esperadas; sin embargo se realizó el tratamiento con el fin de poder comparar con los resultados de la otra etapa y con los de lenteja.

3.3.6. CONSTANTES DE RITTINGER Y BOND

Tabla 23. Resumen de resultados obtenidos del promedio de potencias experimentales y constantes para Garbanzo y Lenteja.

GARBANZO			
T (kg/h)	P (W)	RITTINGER	BOND
		K_R (Whmm/kg)	Wi (kWh/ton)
82.22	308.94	2.1085	3.6079
92.23	210.52	1.4561	2.3746
99.79	230.44	1.4704	2.3992
100.40	156.08	0.8895	1.5052
LENTEJA			
T (kg/h)	P (W)	RITTINGER	BOND
		K_R (Whmm/kg)	Wi (kWh/ton)
67.79	200.90	1.0957	2.3681
78.52	177.12	0.9502	1.9597
84.17	198.00	1.0660	2.1421
90.61	182.70	1.1852	2.1773

Se aplicó un análisis de varianza de una vía con prueba de Tukey al 95 % de confianza, para la comparación de constantes entre velocidades de alimentación para cada una de las leguminosas. La figura 25 presenta el gráfico de cajas para la comparación de la constante de Rittinger y de Bond para garbanzo y posteriormente en la figura 26 se muestran los resultados para lenteja respectivamente. En estos gráficos se aprecia mayor diferencia entre constantes para el garbanzo.

3.3.6.1. CONSTANTES DE RITTINGER Y BOND PARA GARBANZO

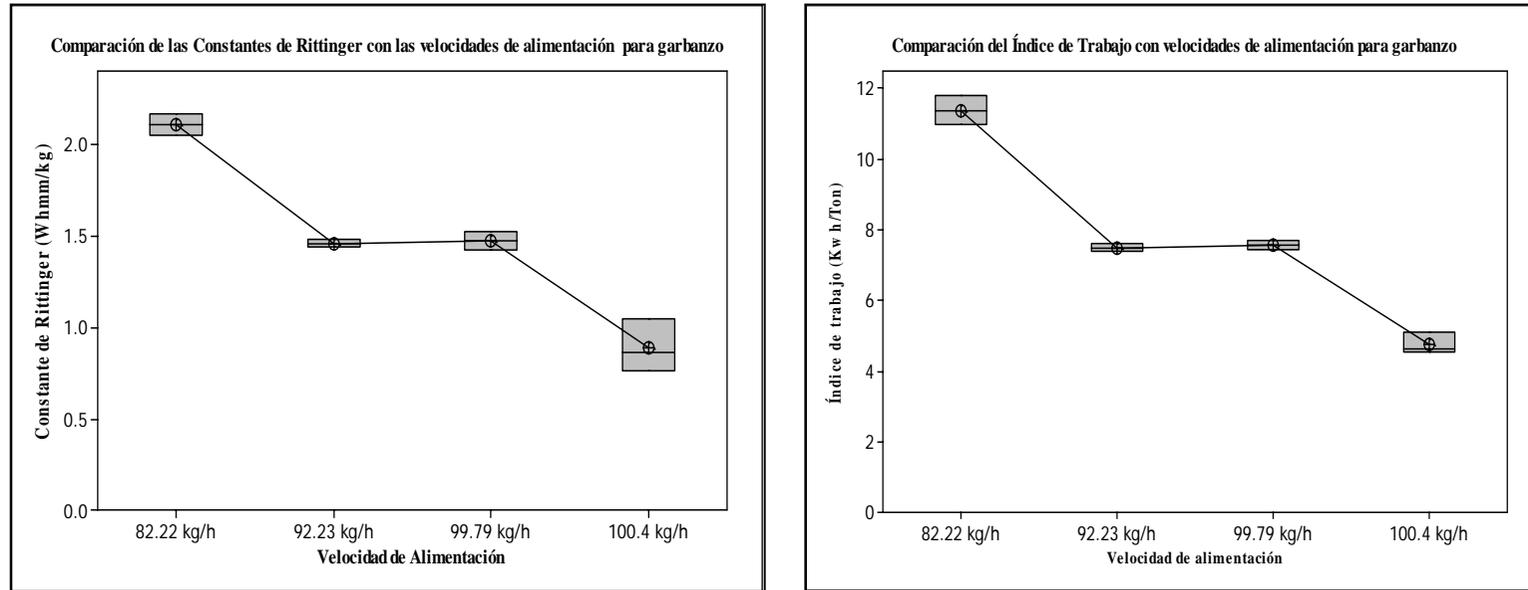


Fig. 25. Constantes de Rittinger y Bond para Garbanzo

Como se puede observar en el diagrama de cajas existe una diferencia en las constantes de Rittinger e Índice de trabajo entre velocidades extremas, sin embargo no hay diferencia entre las intermedias. Cabe comentar que en estos gráficos aumenta el efecto por la escala que maneja.

Tabla 24. Tabla de Anova y prueba de Tukey para Garbanzo a) Rittinger b) Bond

a)

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	3	1.8001	0.6000	56.72	0.000
Error	5	0.0529	0.0106		
Total	8	1.8530			

S = 0.1029 R-Sq = 97.15% R-Sq(adj) = 95.43%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
82.22 kg/h	2	2.1086	0.0828	(---*---)			
92.23 kg/h	2	1.4561	0.0307	(---*---)			
99.79 kg/h	2	1.4704	0.0694	(---*---)			
100.4 kg/h	3	0.8895	0.1419	(---*---)			

0.80 1.20 1.60 2.00

b)

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	3	52.912	17.637	152.70	0.000
Error	5	0.578	0.116		
Total	8	53.490			

S = 0.3399 R-Sq = 98.92% R-Sq(adj) = 98.27%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
82.22 kg/h_1	2	11.389	0.562	(---*---)			
92.23 kg/h_1	2	7.496	0.158	(---*---)			
99.79 kg/h_1	2	7.573	0.186	(---*---)			
100.4 kg/h_1	3	4.751	0.318	(---*---)			

6.0 8.0 10.0 12.0

Se obtuvieron de la tabla de Anova los valores de F y P respectivamente (tabla 24), teniendo un valor de P de 0.000, en ambos casos, lo cual nos indica que las constantes de Rittinger e Índice trabajo difieren de al menos 1 de las velocidades de alimentación; de acuerdo a la tabla de intervalos de confianza individual de 95 % se puede observar que 2 de las velocidades de alimentación (82.22 y 100.4 kg/h) no se superponen entre sí por lo cual se puede decir que las medias son estadísticamente distintas. Estos resultados confirman la conclusión anterior.

3.3.6.2. CONSTANTES DE RITTINGER Y BOND PARA LENTEJA

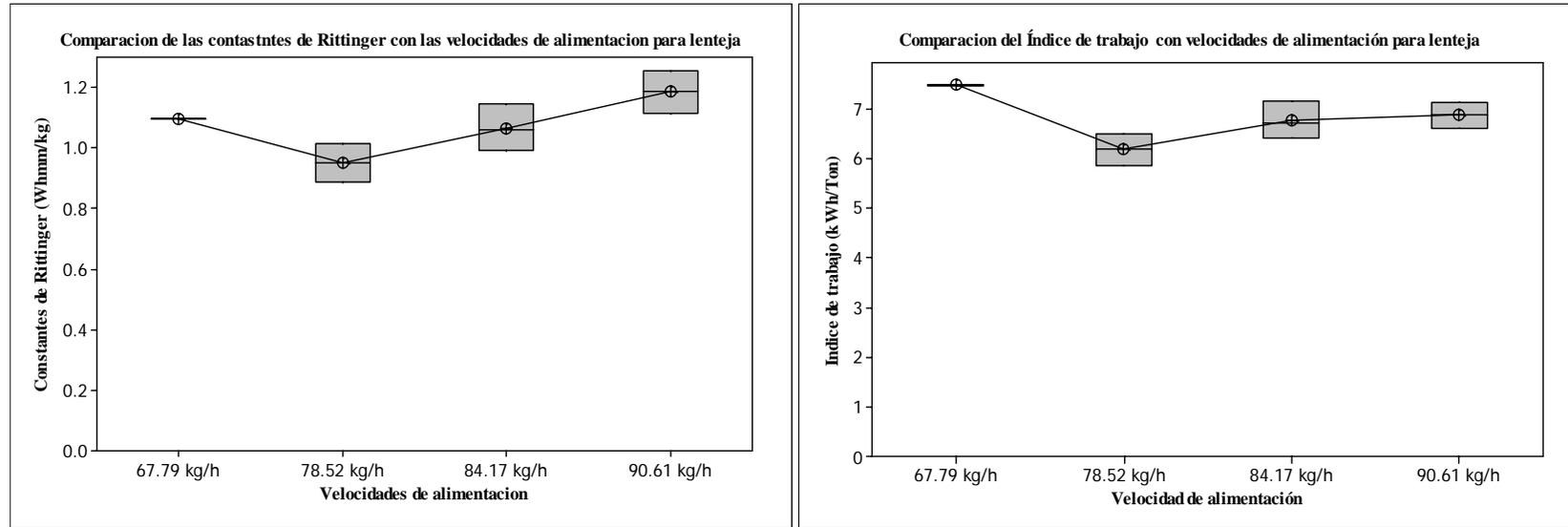


Fig. 26. Constantes de Rittinger y Bond para Lenteja.

En la figura 26 se tiene el diagrama de cajas para la comparación de constantes de Rittinger y Bond para lenteja en donde se puede visualizar la poca variación de las constantes con respecto a las velocidades de alimentación, esto se confirma con la tabla de Anova que se presenta enseguida.

Tabla 25. Tabla de Anova y prueba de Tukey para Lenteja a) Rittinger b) Bond.

a)

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	3	0.05651	0.01884	3.20	0.121
Error	5	0.02940	0.00588		
Total	8	0.08591			

S = 0.07668 R-Sq = 65.78% R-Sq(adj) = 45.25%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
67.79 kg/h	2	1.0957	0.0009	(-----*-----)
78.52 kg/h	2	0.9502	0.0895	(-----*-----)
84.17 kg/h	3	1.0660	0.0767	(-----*-----)
90.61 kgh	2	1.1852	0.0981	(-----*-----)

0.90 1.05 1.20 1.35

b)

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	3	1.678	0.559	4.57	0.068
Error	5	0.612	0.122		
Total	8	2.290			

S = 0.3499 R-Sq = 73.28% R-Sq(adj) = 57.25%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
67.79 kg/h_1	2	7.4754	0.0077	(-----*-----)
78.52 kg/h_1	2	6.1861	0.4465	(-----*-----)
84.17 kg/h_1	3	6.7621	0.3729	(-----*-----)
90.61 kgh_1	2	6.8730	0.3667	(-----*-----)

5.60 6.30 7.00 7.70

En la tabla 25a, se muestra el valor obtenido para $P=0.121$ siendo mayor al valor de 0.05 por lo cual no se rechaza la hipótesis de que las medias sean iguales y se determina que no hay diferencia significativa entre los niveles de las velocidades de alimentación al igual que en la tabla 25b se obtuvo una $P=0.068$ la cual fue ligeramente mayor al nivel de significancia establecido.

Las potencias predichas por las leyes se calcularon utilizando el valor de constante promedio y las velocidades de alimentación de la etapa 1.

Se utilizó un análisis de varianza de dos vías para la comparación entre potencia real y la predicha por la ley de Rittinger y la ley de Bond para ambos materiales.

3.3.7. COMPARACIÓN DE POTENCIAS TEÓRICO-EXPERIMENTAL

3.3.7.1. GARBANZO

En la tabla 26 se presentan los resultados de consumo de potencia experimental y las potencias predichas por las leyes de Rittinger y Bond para el garbanzo.

Tabla 26. Comparación de potencias predichas por las leyes y las potencias reales para Garbanzo.

T (kg/h)	P _{reales} (W)	P _{teóricas} (W)	
		Rittinger	Bond
66.49	204.03	143.64	150.43
83.16	181.62	179.39	187.98
89.50	169.08	186.38	197.81
93.02	170.51	196.13	207.24
117.83	155.10	221.09	243.61

De acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 26 las potencias reales disminuyen conforme aumentan las velocidades de alimentación, mientras que las potencias teóricas ocurre todo lo contrario, esto se puede atribuir a la poca diferencia entre velocidades de alimentación que se logró a través del diseño del dosificador. En la tabla de Anova, el valor de $P=99.2$, habla de que estadísticamente son iguales. Los resultados finales nos muestran que debe haber una diferencia entre velocidades más grande para poder ver el efecto de esta variable; sin embargo es un reto para la experimentación lograr tener un dosificador que controle rangos amplios de velocidad. Aún con este resultado, se puede observar que la comparación entre potencias, también resultó estadísticamente igual, con un valor de P de 0.677.

A continuación se presentan los gráficos comparativos de consumo de potencia con las velocidades de alimentación para garbanzo.

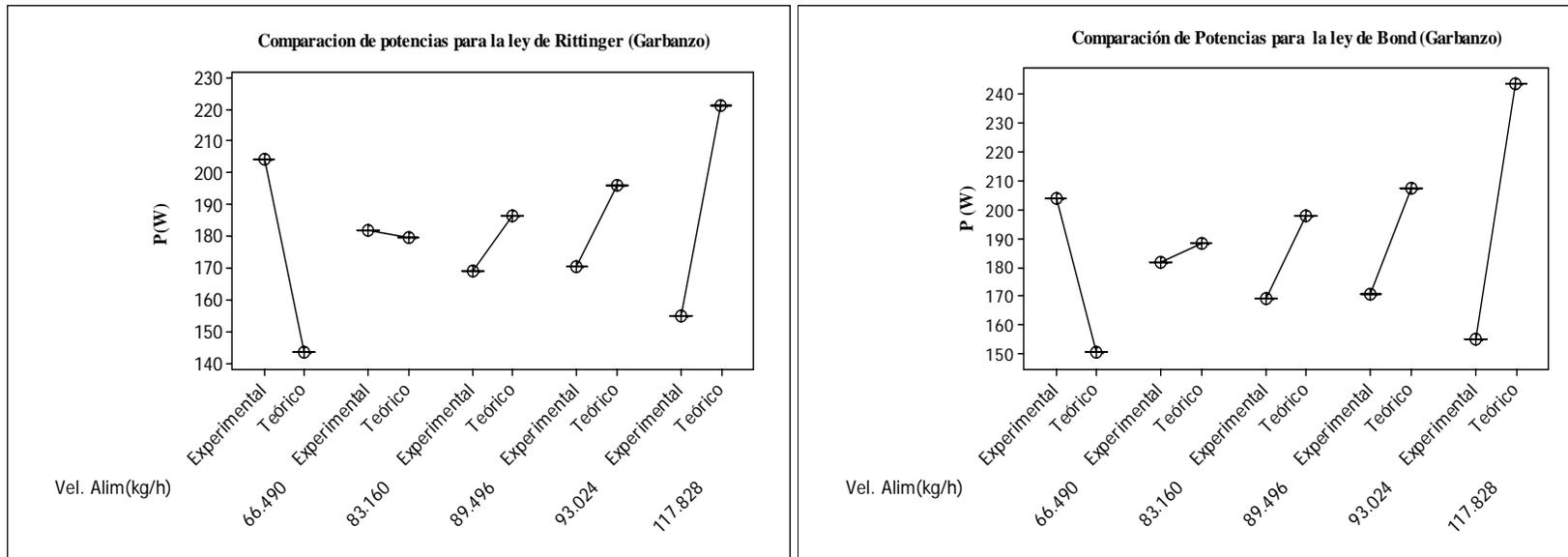


Fig. 27. Comparación entre potencias teórico-experimental para Garbanzo.

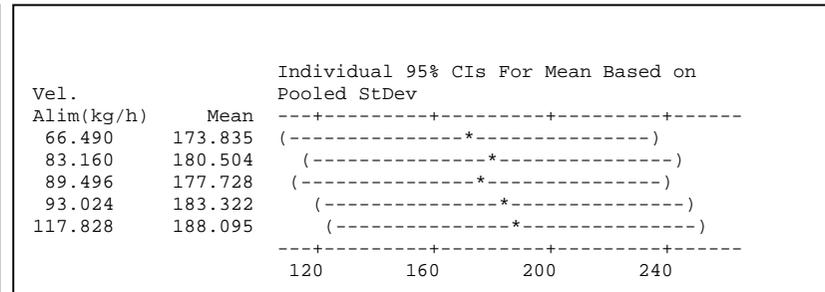
En estos gráficos comparativos puede visualizarse la diferencia en consumo de potencias teórico-experimental, para el caso del consumo teórico este aumenta conforme a la velocidad de alimentación, caso contrario a lo que ocurre con la experimental la cual disminuye, como ya se ha mencionado se tuvo un deficiente manejo en el control de las velocidades para este material.

Tabla 27. Tabla de Anova y prueba de Tukey para Garbanzo a) Rittinger b) Bond.

a)

Source	DF	SS	MS	F	P
Vel. Alim(kg/h)	4	235.12	58.78	0.06	0.992
Comparación	1	214.28	214.28	0.20	0.677
Error	4	4266.79	1066.70		
Total	9	4716.19			

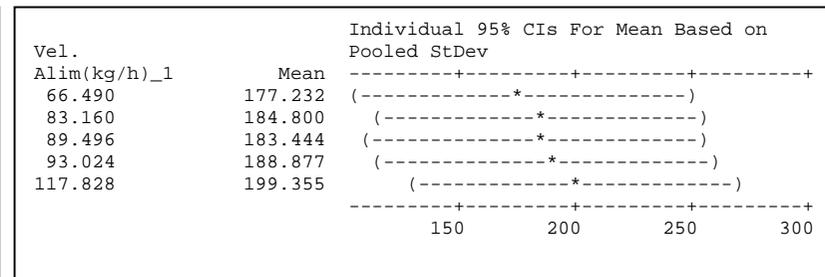
S = 32.66 R-Sq = 9.53% R-Sq(adj) = 0.00%



b)

Source	DF	SS	MS	F	P
Vel. Alim(kg/h)_	4	537.50	134.37	0.10	0.976
Comparacion_1	1	1139.07	1139.07	0.86	0.407
Error	4	5322.01	1330.50		
Total	9	6998.57			

S = 36.48 R-Sq = 23.96% R-Sq(adj) = 0.00%



En la tabla 27, con la prueba de Tukey se observa que finalmente no hubo diferencia entre las velocidades de alimentación logradas con el dosificador. Este fue un problema que repercutió en los resultados finales y que se atribuyó a las características propias del garbanzo.

3.3.7.2. LENTEJA

En la tabla 28 se muestran los resultados de potencias reales y potencias teóricas obtenidos para la lenteja, mientras que el resultado gráfico se observa en la figura 28.

Tabla 28. Comparación de potencias predichas por las leyes y las potencias reales para Lenteja.

T (kg/h)	P _{reales} (W)	P _{teóricas} (W)	
		Rittinger	Bond
47.56	97.76	93.20	99.43
74.59	135.62	147.55	156.92
84.74	227.81	219.52	212.49
96.88	423.58	287.60	264.96
118.08	454.36	356.99	326.70

A diferencia del garbanzo, la potencia real aumentó con el aumento de la velocidad de alimentación. Cabe comentar que el control de la velocidad de alimentación, debido a su forma y tamaño, fue mejor logrado en este producto. Esto implicó que si existiera diferencia más evidente entre velocidades que se confirma con la tabla 29.

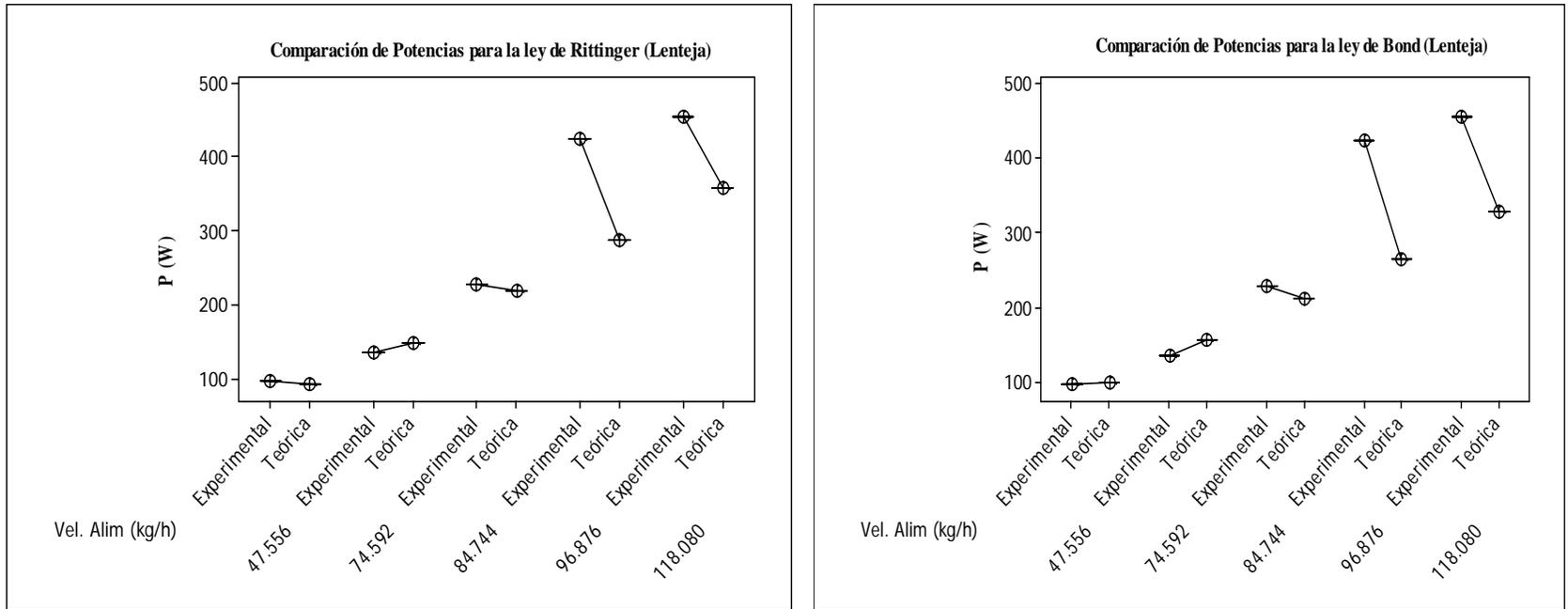


Fig. 28. Comparación de potencias de Ritinger y Bond para Lenteja.

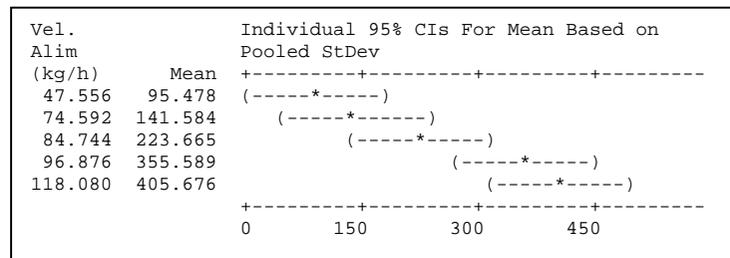
A diferencia del garbanzo la comparación entre potencias fue muy similar sobre todo a velocidades de alimentación bajas, como era de esperarse ambos consumos aumentan conforme a la velocidad de alimentación.

Tabla 29. Tabla de Anova y prueba de Tukey para Lenteja a) Rittinger b) Bond.

a)

Source	DF	SS	MS	F	P
Vel. Alim (kg/h)	4	143103	35775.8	16.61	0.009
Comparacion	1	5489	5488.9	2.55	0.186
Error	4	8614	2153.6		
Total	9	157206			

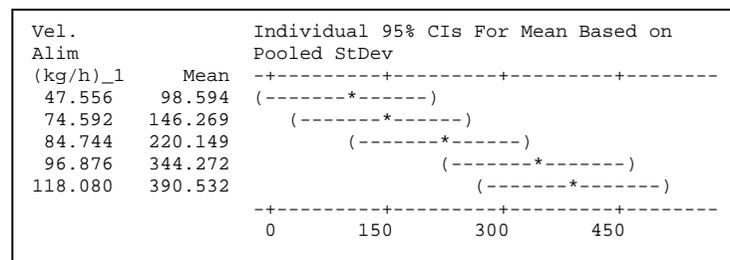
S = 46.41 R-Sq = 94.52% R-Sq(adj) = 87.67%



b)

Source	DF	SS	MS	F	P
Vel. Alim (kg/h)	4	125416	31353.9	9.42	0.026
Comparacion_1	1	7764	7764.0	2.33	0.201
Error	4	13311	3327.7		
Total	9	146490			

S = 57.69 R-Sq = 90.91% R-Sq(adj) = 79.56%



Como se comentó, la tabla 29 muestra que hay diferencia significativa entre las velocidades de alimentación utilizadas, esto era de esperarse ya que se utilizó un análisis de varianza de dos vías, siendo este factor una variable independiente veáse el valor de P de 0.009 y 0.026 para Rittinger y Bond respectivamente; en tanto que el valor de P entre comparaciones resultó mayor de 0.05 (0.20 y 0.18) hablando que estadísticamente son iguales.

Es decir el análisis estadístico demostró que no había diferencia significativa entre los resultados teóricos y los experimentales; sin embargo en los gráficos se puede observar que conforme la velocidad de alimentación aumentó la diferencia entre estas dos potencias se hizo más evidente.

El modelo matemático resultó útil para las velocidades de alimentación bajas, la explicación a este hecho es que el aumento de la velocidad de entrada de la materia prima al equipo, en una molienda restringida por una criba de tamaño fijo, obliga al material a que sea continuamente recirculado a la zona moliente por su incapacidad de salida a la misma velocidad de entrada. Este mismo comportamiento se presentó en la distribución de tamaños obtenida resultando en productos más finos como se discutió anteriormente. Esto se manifiesta en un consumo real de energía mayor que el que se predice de manera teórica.

También se puede observar de estos gráficos que la predicción con ley de Rittinger y de Bond fue muy parecida.

A pesar de que el estadístico no muestra diferencias significativas para el garbanzo, se observa un comportamiento diferente a lo observado en la lenteja. En este caso el comportamiento es más incierto sobre todo en las primeras velocidades. A pesar de eso, la diferencia entre el resultado real y lo predicho se hace más patente cuando la velocidad de alimentación aumenta. La predicción del consumo de potencia con ambas leyes para el garbanzo no fue tan satisfactoria como para la lenteja.

CONCLUSIONES.

Durante el análisis de resultados realizados se hizo patente la fuerte influencia que tiene la velocidad de alimentación en el consumo de potencia. En el caso del garbanzo fue tan determinante que los resultados logrados con el dosificador fueron poco satisfactorios, resultando en un control deficiente de las velocidades de alimentación y esto se atribuyó a la forma y tamaño del mismo. A este hecho se sumó la mayor dureza del garbanzo provocando una necesidad mayor de potencia para su fractura. El hecho de que no se hubiese logrado un amplio rango entre velocidades de alimentación provocó que estadísticamente no hubiera diferencia significativa, repercutiendo en los resultados de intensidad de corriente medida, obteniendo un comportamiento incierto. Así mismo los valores de constante también resultaron con un comportamiento poco esperado.

En el caso de las distribuciones de tamaño obtenidas, se encontró una distribución más amplia y más gruesa al compararse con la lenteja; la dureza es el factor determinante en este comportamiento.

En el caso de la lenteja se pudo comprobar que a mayor velocidad el consumo de potencia aumenta, este fenómeno se asocia a que a mayor entrada de masa a un mismo tiempo el producto permanece más tiempo en la zona de molienda ya que no alcanza a salir por la criba que lo restringe en la salida, dando como resultado un producto más fino y mayor cantidad de energía entregada. Este consumo de energía utilizado en reducir de tamaño más de lo especificado por la criba de salida, puede representar un consumo innecesario puesto que el producto alcanza un tamaño mucho menor del que en realidad se quiere alcanzar.

No se encontró diferencia significativa entre los consumos de potencia reales y los predichos por las leyes de Rittinger y Bond para lenteja sobre todo cuando las velocidades de alimentación son bajas. A mayores velocidades de alimentación el consumo de potencia real es mayor que el que se predice.

La predicción del consumo de potencia con las leyes de Rittinger y Bond fue mejor con la lenteja que con el garbanzo. Es evidente que las características del material representan un aspecto de importancia a considerar.

Por otro lado, se puede generalizar y observar que los consumos de potencia mayores se tuvieron con la lenteja y que parte de la energía entregada se utilizó en la producción de finos.

Este trabajo demuestra la importancia de las características físicas que tiene el material en relación a los consumos de potencia requeridos para su molienda y que tanto la ley de Rittinger como la de Bond resultaron satisfactorias para predecir su necesidad energética sobre todo en bajas velocidades de alimentación y para productos como la lenteja.

De acuerdo a nuestra hipótesis se esperaba que la forma fuera determinante ya que el poco espesor y tamaño de la lenteja en comparación con el garbanzo representaba una mayor dificultad durante su molienda debido a la menor área de contacto con los elementos molientes lo cual se vería reflejado en un consumo de potencia mayor y por lo tanto un distribución de tamaños más amplia; de acuerdo a los resultados obtenidos indican que efectivamente la forma y el tamaño influyeron en el aumento del consumo de potencia durante la molienda de lenteja sin embargo la distribución resultó ser más homogénea y productos más finos lo cual difiere a lo esperado. En este sentido la dureza del garbanzo, jugó un papel importante demostrando una necesidad mayor de potencia para lograr productos del mismo tamaño que la lenteja.

También se esperaba que al comparar los consumos de potencia reales con los predichos por las leyes de Rittinger y Bond hubiera diferencias; sin embargo se encontró que estadísticamente estas leyes pueden predecir los consumos de potencia, sobre todo en aquellas moliendas en donde se garantice poca recirculación del material en la zona de molienda.

REFERENCIAS

- Austin, L. A. (1973). A Commentary on the Kick, Bond and Rittinger laws of grinding. *Powder Technology*, 7, 315-317.
- Aykroyd, W. R y Doughty, J. (1964). *Las leguminosas en la nutrición humana*. No 19. FAO, Italia.
- Badger, W. L y Julius, T. (1986). *Introducción a la Ingeniería Química*. McGraw- Hill, México.
- Beshada, E., Bux, M. y Waldenmaier, T. (2006). Design and Optimization of a Photovoltaic Powered Grain Mill. *Dept of agricultural engineering*, 8, 1-11.
- Brennan, J. G., Cowell, N. D., Butters, J. R y Lilley, A. E. V. (1998). *Las operaciones de la Ingeniería de Alimentos*. 3^{ra} ed. Acribia, España.
- Coello, A., Laborde, R., Marrero, S. y Angulo, O. (2000). Productividad y Eficiencia Energética en el Proceso de Molienda del Mineral Laterítico. *Minería y Geología*, 17, No 2, 79-83.
- Coello, V. A. y Tijinov, O. N. (2001). Molienda de minerales multicomponentes: Modelo integro-diferencial para la valoración de la energía. *Minería y Geología*, 17, No. 3-4, 49-53.
- Cortazar, F., Meléndez, R., y Oliver, D. (2008). Consumo de energía y distribución de tamaño de partícula en la molienda de Canela y Pimienta negra. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7, 123-130.
- Coulson, J. M., Richardson, J. F., Backhurst, J. R y Harker, J. H. (1981). *Ingeniería química. Operaciones básicas*. 3^{ra} ed. Tomo II. Reverté, España.
- Djantou, E. B., Mbofung, C. M., Scher, J. y Desobry, S. (2006). A modeling approach to determine the effect of pre-treatment on the grinding ability of dried mangoes for powder production. *Journal of food engineering*, 668-677.
- Geankoplis, C. J. (2006). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3^{ra} ed. Continental, México.
- Gordillo, E. M. (1991). *El Garbanzo una alternativa para el secado*. Mundi-prensa, España.
- Guerrero, A. G. (1984). *Cultivos herbáceos extensivos*. 3^{ra} ed. Mundi-prensa, España.
- Grochowicz, J. y Andrejko, D. (2006). Effect of the moisture content on Energy consumption at grinding of lupine seeds. *Department of engineering and machines of food processing industry agricultural*, 22-28.

- Gutsche, O. y Fuerstenau, D. W. (2004). Influence of particle size and shape on the comminution of single particles in a rigidly mounted roll mill. *Powder technology*, 186-195.
- Harnett, D. L y Murphy, J. L. (1987). *Introducción al análisis estadístico*. Addison-Wesley Iberoamericana, Argentina.
- Helman, J. (1981). *Farmacotecnia teórica y práctica*. Tomo 4. Continental, Bolivia.
- Harnett, L. y Murphy, J. L. (1987). *Introducción al análisis estadístico*. Addison Wesley Iberoamericana, Argentina.
- Key, D. E. (1979). *Legumbres Alimenticias*. Acribia , España.
- Kraut, S. F. (1991). *Tablas de composición de los alimentos*, 2^{da} ed, Acribia, España.
- Kusinska, E., Zawislak, K. y Sobczak, P. (2008). Energy consumption of maize grain crushing depending on moisture content. *Departament of food engineering and machines*, 129-134.
- McCabe, W. L., Smith, J. C. y Harriot P. (1999). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 4^{ta} ed. McGraw-Hill, España.
- Perry, R. H. y Chilton, C. (1982). *Manual del Ingeniero Químico*. 2^{da} ed. Vol. 1. McGraw-Hill, México.
- Tanaka, T. (1966). Comminution Laws, *Hokkaido University* 5. No.4, 353-358.
- Tousimi K, C., Makridou, O., Agrafiotis, C., Konstandopoulos, A. G., Zannis, G. y Founti, M. (2007). On-line measurements of industrial minerals' particle size during milling, *CERTH/CPERI*.
- Valderrama, W. y Magne, L. (1996). Efecto del diseño de revestimientos sobre el consumo de potencia en molienda. *Revista Metal*, 4, 215-222.
- Consumer Eroski. 2009. Lenteja (en línea). España.19 de enero, 2009. Disponible en <http://www.consumer.es>
- http://www.engormix.com/interaccion_ingredientes_procesos_produccion_s_articulos_175_3_BAL.htm
- Información Técnica Agrícola. Garbanzo (en línea). España. Disponible en <http://www.infoagro.com/herbaceos/legumbres/garbanzo.htm>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y pesca .Estimaciones agrícolas de lenteja (en línea). Argentina. Disponible en <http://www.sagpya.mecon.gov.ar>