



ANÁLISIS DE LA MOLIENDA DE EXPELLER DE SOJA EVALUANDO LA PERFORMANCE DE DIFERENTES TIPOS DE MOLINOS

ANALYSIS OF SOYBEAN EXPELLER MILLING OPERATION BY PERFORMANCE EVALUATION OF DIFFERENT TYPES OF MILLS

C. D'Emanuele Ares¹, C. Accoroni¹, L. Ferigutti¹, E. Godoy^{1*}, M. A. Reinheimer¹⁻²

¹CAIMI-Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería - UTN, FRRO - Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Zeballos 1346, S2000BQA Rosario -Argentina

²CONICET - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -Argentina.

Recibido 21 de Noviembre de 2016; Aceptado 30 de Mayo de 2017

Resumen

El objetivo del presente trabajo es analizar la performance del proceso de molienda y tamizado de expeller de soja, subproducto de la extracción de aceite por el método de extrusado-prensado, para su posterior utilización en la obtención de productos proteicos. La molienda se realiza con tres molinos diferentes: de bolas (impacto), de rodillos (cizalla y compresión) y de cuchillas (cizalla), bajo diferentes condiciones de operación. El análisis de tamizado se realiza utilizando la serie de tamices ASTM N° 5, 6, 10, 12, 25, 30 y ciego. Los productos obtenidos se clasifican en finos, medios, y gruesos, analizándose así los rendimientos de cada fracción en cada molino. Al ser la fracción de interés la correspondiente a las partículas de tamaño medio, se concluye que los molinos de cuchillas y de rodillos son más adecuados debido a que se alcanzan rendimientos superiores al 55% cuando se los opera con una sola pasada. Asimismo, se calculan y reportan las energías específicas desarrolladas en las moliendas con la Ley de Bond para exponer una comparativa.

Palabras clave: molienda, tamizado, expeller, distribución de tamaño, Ley de Bond.

Abstract

The objective of this work is to analyze the performance of a milling and grinding process for soybean expeller, which is a by-product of the oil extraction by means of the extruding-pressing method, for its later use in obtaining protein products. Milling is done with three different mills: balls (impact), rollers (shear and compression) and blades (shear), under different operating conditions. The analysis of the grinding operation is done using the ASTM sieve series N° 5, 6, 10, 12, 25, 30 and pan. The obtained products are classified in fine, medium and large, thus analyzing the yields of each fraction in each mill. Being the interest's fraction the corresponding to medium sized particles, it is concluded that the roller and blades mills are the most adequate once since yields greater than 55% are achieved when operated with a single pass. Also, the specific energies developed for the milling were calculated with the Bond's Law for comparison purposes.

Keywords: milling, grinding, expeller, size distribution, Bond's Law.

1 Introducción

El cultivo de soja ha estado relacionado históricamente con la extracción industrial de aceite. El método de extracción de aceite más difundido y adoptado por empresas de gran capacidad de procesamiento, es el método de extracción con solvente dada su alta eficiencia. Sin embargo, en la última década se ha implementado el método físico de extrusado y prensado de soja, el cual es menos eficiente en rendimiento que el anterior pero adaptable

a pequeñas escalas productivas. Los principales subproductos de la extracción de aceite de soja son: copos y harinas (extracción con solvente), y expeller (extracción física).

A pesar de la relevancia de la extracción industrial de aceite, se ha generado un gran desarrollo científico y tecnológico para el aprovechamiento integral de las proteínas. Estas proteínas vegetales poseen propiedades nutritivas que representan una alternativa

* Autor para la correspondencia. E-mail: ezgodoy@frro.utn.edu.ar

muy importante para suplir la deficiencia existente de proteínas de origen animal, como las de la leche, la carne y el huevo (Baigorri y Salado Navarro, 2012; Baudi Dergal, 2013).

La cadena de agregado de valor de la soja presenta un elevado número de productos que podrían utilizar a los subproductos de la extracción de aceite como materia prima. Los productos obtenidos a partir de la extracción y concentración de las proteínas de soja, además de incrementar el valor añadido de este subproducto, según Sunley (1995), brindan las siguientes ventajas:

- proveen una fuente de proteína más concentrada, deseable para mejorar los requerimientos proteicos,
- mejoran las propiedades funcionales de las proteínas respecto a su forma original, ofreciendo aplicaciones en otros productos alimenticios, además, de aquellos puramente vinculados a una fuente proteica para propósitos nutricionales,
- reducen las propiedades menos deseables de la fuente proteica (ej. factores antinutricionales y características de sabor y aroma indeseadas) al ser sometidos a procesos de concentración, aislación y texturización.

Estos procesos de extracción y concentración requieren como etapa preliminar, homogeneizar y disminuir el tamaño de partícula de los subproductos, siendo la molienda un factor importante que influye en la eficiencia del proceso. En los sistemas de extracción de aceite de soja, ha sido demostrado que la eficiencia del proceso es afectada significativamente por el tamaño de partícula del grano de soja inicial. Además, se ha demostrado que la calidad del aceite extraído también es afectada por el tamaño de partícula de la materia prima inicial (Russin y col., 2007). El proceso de molienda y tamizado resulta ser una de las principales operaciones de acondicionamiento para la elaboración de diversos productos, ya sea alimenticios (Cortazar-Figueroa y col., 2008; Olguin-Arteaga y col., 2015; Tirado-Gallegos y col., 2016) o materiales de construcción (Cruz-Salgado y col., 2016; Kutuk, 2016).

Del análisis de la bibliografía recabada en cuanto a la operación de molienda y tamizado para la industria que produce aceites y concentrados proteicos, los datos encontrados han sido muy diversos en cuanto a la influencia del tamaño de partícula en el

proceso posterior de recuperación y/o extracción de proteínas. Se puede resaltar que algunos autores como Konwinski (1992), Sunley (1995) y Wang y col. (2007), utilizaron un subproducto de extracción de aceite de soja como materia prima para la molienda caracterizado por tener el tamaño de partícula que es retenido entre las mallas ASTM N° 20 y 40. Asimismo se ha encontrado en las fuentes consultadas que las partículas finas y el polvo causan problemas en los equipos, ya que se produce la formación de tortas y aglomeraciones que disminuyen la eficiencia en la transferencia de calor y de materia, en las etapas posteriores de operación (Konwinski, 1992).

Con base en las investigaciones que realizaron estos autores, se define para este trabajo como:

- Fracción gruesa (retenido por las mallas ASTM N° 5 y 6),
- Fracción media (retenido por las mallas ASTM N° 10, 12 y 25),
- Fracción fina (retenido por las mallas ASTM N° 30 y ciego recolector).

Además se determina que el fragmento de interés en las moliendas que se efectúan para los fines de esta investigación, es la fracción correspondiente a las partículas medias.

Al ser el proceso de molienda una operación de acondicionamiento primordial para facilitar la extracción de la proteína deseada, también debe ser significativa la elección del molino que desarrolle:

- El tamaño de partículas óptimo necesario para la operación unitaria posterior,
- Una menor cantidad de pérdidas posibles,
- Una mayor eficiencia energética.

Las primeras dos condiciones se comprenden en los cálculos de rendimiento, y la restante se aprecia en el cómputo de la energía requerida por unidad de masa según los criterios de la Ley de Bond.

Se cuenta en esta experiencia con tres molinos que actúan con fuerzas diferentes para moler las partículas de materia inicial: molino de bolas empleando fuerza de impacto, molino de rodillos que combina fuerzas de cizalla y compresión, y molino de cuchillas que ejerce esencialmente fuerzas de cizalla para llevar a cabo la ruptura. Además se aprecia que existiendo dos modos de operación en la industria: continuo y discontinuo; los molinos de cuchillas y de rodillos corresponden al primer grupo mientras que el molino de bolas pertenece al segundo.

1.1 Objetivos

La finalidad del presente trabajo es estudiar la operación de molienda y tamizado en dos muestras de expeller de soja de empresas aledañas a Rosario, para evaluar su comportamiento en tres molinos diferentes: de bolas, de rodillos y de cuchillas.

Posteriormente se busca analizar las diferentes fracciones de tamaños de partícula, en función de las características de los molinos, con vistas a futuro de ser utilizadas para la extracción de proteínas para la obtención de productos proteicos.

2 Metodología

2.1 Procedimiento experimental de muestreo y tamizado

Las muestras que se emplean en el presente trabajo están constituidas por expeller de soja, sub-producto de la extracción de aceite por extrusado y prensado, proveniente de dos empresas localizadas en la provincia de Santa Fe, denominadas "Muestra 1" y "Muestra 2".

Para el procedimiento de tamizado, se utiliza un equipo Ro-Tap (Tyler, Estados Unidos), y tamices (Macotest, Argentina), correspondientes a la serie ASTM N° 5, 6, 10, 12, 25, 30 y ciego. Del material a tamizar, se separan por el método de cuarteo y se pesan 100 gramos de muestra que se utilizan en el procedimiento (Según norma tamizado ASTM D422-63). Luego de 30 minutos, se determina el peso del contenido retenido en cada tamiz, que posteriormente se utiliza para realizar curvas de distribución de tamaño de partículas.

2.2 Procedimiento experimental de molienda

2.2.1. Molino de bolas

Se utiliza un equipo (Cemac, Argentina), con una potencia de 0.60 HP y una velocidad de giro de 48 revoluciones por minuto. El mismo cuenta con tres tamaños diferentes de bolas de arcilla, con un peso total de 11.1 kg. El total de la muestra de expeller empleada para la molienda fue de 2.1 kg. Se verifica un grado de llenado del 25%, según Duda (1977).

En el presente trabajo, se analizan la performance del molino y la distribución de tamaños para los siguientes casos:

- De la muestra provista por las empresas, se obtiene una primera curva de distribución que llamaremos en adelante "Expeller Inicial".
- Luego de moler la materia prima durante 30 minutos, se retira también por cuarteo 100 gramos del material, para así obtener la distribución de tamaños correspondiente a "Expeller 30 minutos".
- Sucesivamente, se obtienen las distribuciones de tamaño "Expeller 60 minutos", "Expeller 90 minutos" y "Expeller 120 minutos" al procesar el material durante el tiempo declarado.

Molino de rodillos

Las muestras se procesan en un molino de rodillos (Beide, China), con una potencia de 5.36 HP y 1435 rpm.

Inicialmente, ambas muestras, se pesan y separan 1 kg por duplicado y se realizan dos corridas. Las corridas 1 y 2 corresponden a la "Muestra 1" y la 3 y 4 a la "Muestra 2".

- Corrida 1 y 3: primera pasada con apertura de rodillos 0.3 mm y la segunda con una apertura de 0.1 mm.
- Corrida 2 y 4: ambas pasados con apertura de rodillos de 0.1 mm.

Se toma una muestra de cada corrida y se analiza por tamizado con la metodología antes mencionada.

Molino de cuchillas

Las muestras se procesan en un molino de cuchillas (Sojamet, Argentina), con una potencia de 1 HP y 2870 rpm.

Inicialmente, ambas muestras, se pesan y separan 1 kg. De cada muestra se realizan dos pasadas consecutivas.

2.3 Retenido y retenido acumulado

El producto descargado de un molino puede ser sometido a una separación por tamaños mediante tamizado, y por ende, obtener las cantidades de producto de tamaño superior a la luz de cada tamiz. Dicho análisis granulométrico se realiza colocando varios tamices superpuestos ordenados de arriba a abajo por orden decreciente de la luz de la malla. En el tamiz superior se colocan 100 gramos de

producto, quedando sobre cada uno de los tamices una cantidad del mismo denominada rechazo de ese tamiz o retenido.

Se define Retenido Porcentual por cada tamiz ($R_i^{\%}$) como la razón entre la fracción retenida en la i -ésima malla (m_i), y la sumatoria de las masas retenidas en todos los tamices ($\sum_{i=1}^n m_i$), como se muestra en la Ec. (1).

$$R_i^{\%} = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \times 100 \quad (1)$$

Asimismo, el Retenido Acumulado Porcentual ($A_i^{\%}$) se calcula mediante la Ec. (2), como la suma de los retenidos porcentuales desde el número de malla más pequeño hasta la i -ésima.

$$A_i^{\%} = \sum_{j=1}^i R_j^{\%} \quad (2)$$

2.4 Distribución de tamaños: Correlación de Rosin, Rammler y Sperling

Luego del estudio de numerosas curvas de este tipo, Rosin, Rammler y Sperling (Vian y Ocón, 1952) definieron una expresión matemática de gran generalidad, y que modificada por Bennet, se puede escribir de forma integral según la Ec. (3), donde $R_{i,RRS}^{\%}$ representan los valores de los Rechazos Acumulados Porcentuales, l los tamaños lineales (que se asumen iguales a las luces de las mallas de los tamices), l' el tamaño estadístico, y n el índice de uniformidad de tamaños del producto.

$$R_{i,RRS}^{\%} = e^{-(l/l')^n} \times 100 \quad (3)$$

Si en la Ec. (3) se toma $l = l'$, entonces $\ln 1/R_{i,RRS}^{\%} = 0$, y $R_{i,RRS}^{\%} = 36.8\%$. Al valor de l que cumple esta condición se lo llama tamaño medio estadístico l' .

Para el cálculo de la predicción de los rechazos acumulados, el método RRS requiere asimismo conocer el índice de uniformidad de tamaños del producto n .

2.5 Trabajo necesario de molienda. Ley de Bond

La teoría de Bond (Bond, 1960) supone que el trabajo para romper una partícula es igual al que se necesita para sobrepasar su deformación crítica, de manera que la energía necesaria es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tamaño producido.

Entonces, la energía requerida por unidad de masa E (kWh/ton), se calcula como se detalla en la Ec. (4),

donde D_{pp} y D_{pa} son los diámetros característicos de las partículas del producto y de las partículas alimentadas (mm), respectivamente.

Se define como “índice de trabajo de Bond” W_i a la energía total que se necesita para reducir una alimentación muy grande hasta un tamaño tal que el 80% del producto pase a través de un tamiz de 0.100 mm. Esta constante depende de la dureza del material a moler y varía entre 8 y 24 kWh/ton para materiales muy blandos y extremadamente duros, respectivamente (Ocampo Ramírez y col., 2015).

$$E = \sqrt{0.100} W_i \left(\frac{1}{D_{pp}} - \frac{1}{D_{pa}} \right) \quad (4)$$

2.6 Rendimiento de la molienda

Se define la Ec. (5) como rendimiento porcentual de cada fracción ($\eta_i^{\%}$), al peso total de cada una (P_i), sobre el peso total de material inicial a moler (P_{T0}). Siendo i : finos, medios o gruesos.

$$\eta_i^{\%} = \frac{P_i}{P_{T0}} \times 100 \quad (5)$$

Al utilizar el peso total del material inicial, en lugar del peso total del producto final, dicho rendimiento tiene en cuenta las pérdidas que ocasiona el proceso de molienda.

Cada molino posee un grado de hermetismo diferente, lo cual genera un desperdicio de material distinto.

3 Resultados y discusión

3.1 Retenido y retenido acumulado

3.1.1. Molino de bolas

Los resultados obtenidos por tamizado para las experiencias “Expeller Inicial, 30, 60, 90 y 120 minutos” se representan en la Fig. 1a, donde se llevan a un sistema de coordenadas rectangulares el porcentaje retenido en forma diferencial de cada tamiz frente al N° de dicho tamiz.

En la Fig. 1b, se presentan los porcentajes retenidos acumulados respectivos. Aquí las ordenadas representan el tanto por ciento de producto original cuyas partículas son mayores que la abertura del tamiz correspondiente.

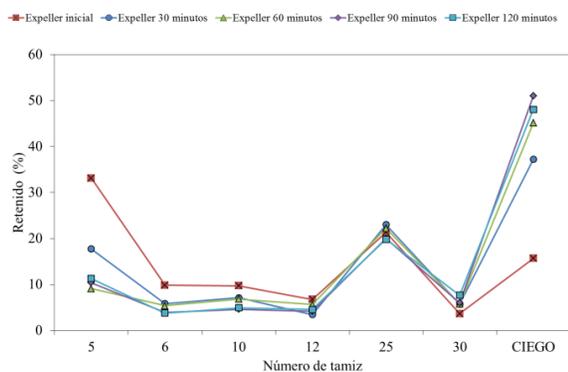


Fig. 1a. Retenido.

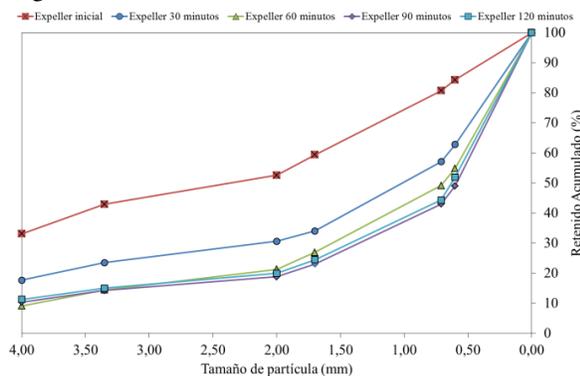


Fig. 1b. Retenido Acumulado.

Fig. 1. Distribución de tamaños correspondientes a "Expeller Inicial, 30, 60, 90 y 120 minutos". Molino de Bolas.

3.1.2. Molino de rodillos

Del mismo modo que para el molino de bolas, se presenta en las Fig. 2, los retenidos y retenidos acumulados para los análisis de tamizado de las corridas de la muestra elegida como la más representativa.

Debido a que se observa comportamiento similar en ambas muestras, solo se han presentado los resultados correspondientes a la "Muestra 2".

3.1.2. Molino de cuchillas

Se presentan en las Fig. 3, los retenidos y retenidos acumulados para los análisis de tamizado de las

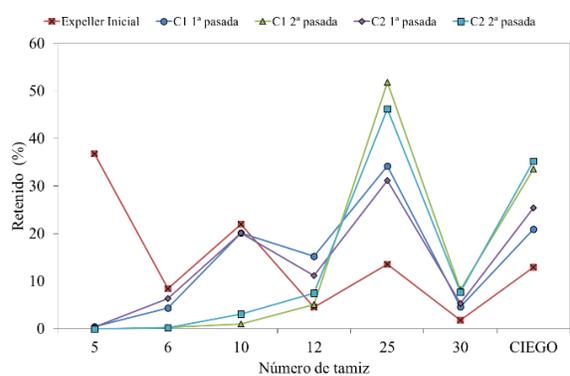


Fig. 2a. Retenido.

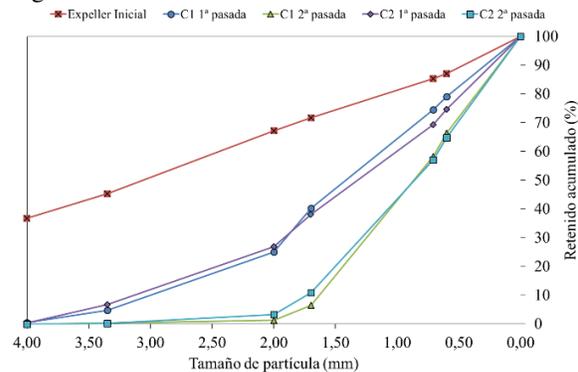


Fig. 2b. Retenido Acumulado.

Fig. 2. Distribución de tamaños correspondientes a la "Muestra 1". Molino de Rodillos.

pasadas correspondientes realizadas en el molino de cuchillas.

3.2 Parámetros de la correlación de Rosin, Rammler y Sperling

A partir de la correlación desarrollada en la sección 2.4, se obtienen los parámetros del modelo de RRS presentados en la Tabla 1. Además, se reportan los coeficientes de correlación R^2 para el ajuste del modelo de RRS para cada experiencia de molienda, de donde se aprecia un adecuado ajuste de los datos experimentales. Todas las corridas presentan muy buenos valores de R^2 (>0.96), excepto las dos últimas corridas para el molino de cuchillas, que presentan valores más bajos, pero que igualmente pueden ser considerados substanciales para el ajuste (Hair, 2010).

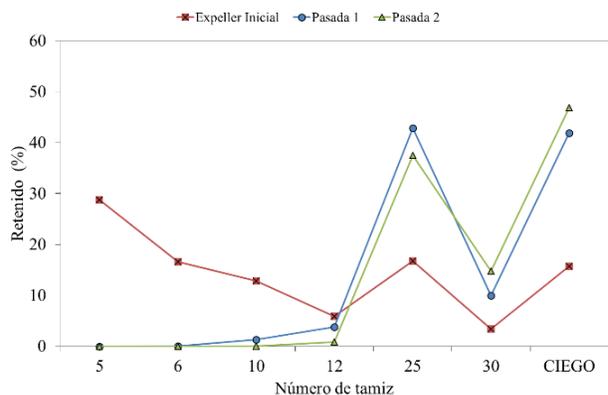


Fig. 3a. Retenido.

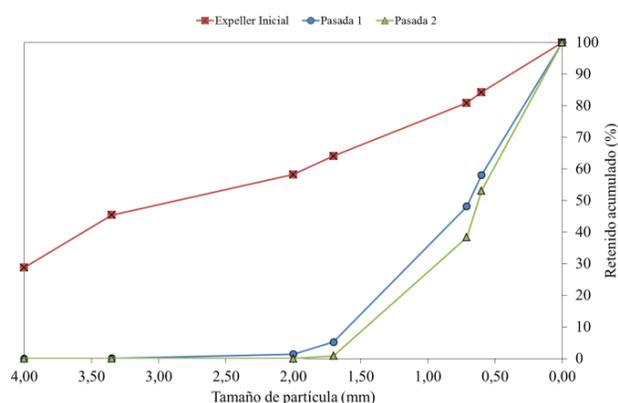


Fig. 3b. Retenido Acumulado.

Fig. 3. Distribución de tamaños correspondientes a la “Muestra 1”. Molino de Cuchillas.

Tabla 1. Parámetros de RRS.

Parámetros				
Molino de Bolas	Expeller Inicial M2	0.9984	3.6871	0.9847
	Expeller 30 minutos	0.6642	1.5827	0.9954
	Expeller 60 minutos	1.1618	1.2601	0.9652
	Expeller 90 minutos	1.0193	1.0176	0.9736
	Expeller 120 minutos	1.0806	1.0853	0.9682
Molino de Rodillos	Expeller Inicial M1	1.1881	4.0016	0.9929
	Corrida 1 Pasada 1	1.4736	1.7679	0.9974
	Corrida 1 Pasada 2	1.0015	1.1195	0.974
	Corrida 2 Pasada 1	1.6183	1.7347	0.9852
	Corrida 2 Pasada 2	1.0201	1.1434	0.9866
	Expeller Inicial M2	0.9984	3.6871	0.9847
	Corrida 3 Pasada 1	1.4242	1.4533	0.9973
	Corrida 3 Pasada 2	1.0421	1.1583	0.9828
Molino de Cuchillas	Corrida 4 Pasada 1	1.1332	1.0277	0.9865
	Corrida 4 Pasada 2	0.9058	1.0132	0.9726
	Expeller Inicial M1	1.1881	4.0016	0.9929
	Pasada 1	9.287	0.961	0.875
	Pasada 2	1.0386	0.937	0.8859
	Expeller Inicial M2	0.9984	3.6871	0.9847
	Pasada 1	1.4242	0.9712	0.9962
	Pasada 2	1.0421	0.7515	0.9624

Tabla 2. Valores de Diámetro Característico y Trabajo de Bond. Molino de Bolas.

Parámetros	Expeller Inicial	Expeller 30 minutos	Expeller 60 minutos	Expeller 90 minutos	Expeller 120 minutos
Dp_i (mm)	0.487	0.374	0.225	0.192	0.2
E (kWh/ton)	-	0.016	0.054	0.068	0.064

Tabla 3. Valores de Diámetro Característico y Trabajo de Bond. Molino de Rodillos. "Muestra 1".

Parámetros	Expeller Inicial	Corrida 1 Pasada 1	Corrida 1 Pasada 2	Corrida 2 Pasada 1	Corrida 2 Pasada 2
Dp_i (mm)	0.529	0.233	0.144	0.246	0.15
E (kWh/ton)	-	0.056	0.101	0.051	0.096

Tabla 4. Valores de Diámetro Característico y Trabajo de Bond. Molino de Rodillos. "Muestra 2".

Parámetros	Expeller Inicial	Corrida 3 Pasada 1	Corrida 3 Pasada 2	Corrida 4 Pasada 1	Corrida 4 Pasada 2
Dp_i (mm)	0.435	0.186	0.151	0.165	0.137
E (kWh/ton)	-	0.064	0.085	0.076	0.094

Tabla 5. Valores de Diámetro Característico y Trabajo de Bond. Molino de Cuchillas. "Muestra 1".

Parámetros	Expeller Inicial	Pasada 1	Pasada 2
Dp_i (mm)	0.529	0.142	0.136
E (kWh/ton)	-	0.103	0.107

Tabla 6. Valores de Diámetro Característico y Trabajo de Bond. Molino de Cuchillas. "Muestra 2".

Parámetros	Expeller Inicial	Pasada 1	Pasada 2
Dp_i (mm)	0.435	0.136	0.119
E (kWh/ton)	-	0.096	0.11

3.3 Energía requerida para la molienda

Según se presentó en la sección 2.5, para computar el trabajo necesario en el proceso de molienda, y asumiendo que el expeller de soja se comporta como un "material blando", se adopta un valor del índice de trabajo de Bond de 8 kW-h/ton.

Para el cálculo de los diámetros característicos de las partículas en cada tamizado DP_i , se ha interpolado el tamaño de partícula (como el valor de la abertura del tamiz) que corresponde al 20% retenido (80% pasante) en cada experiencia. Así, el valor de la energía por unidad de masa para cada molienda (referida siempre al "Expeller Inicial"), se muestran en las Tabla II, III, IV, V y VI.

Para el molino de bolas, los resultados muestran que a partir de los 90 minutos de operación existe una tendencia constante al gasto de energía por unidad de

masa.

Respecto del trabajo necesario de molienda para el molino de rodillos, se observan similares tendencias para la primera pasada con un valor promedio de 0.062 kWh/ton.

En el molino de cuchillas, ambas muestras arrojan valores similares con respecto al gasto energético requerido. Esto, además de suponer un trabajo constante si se extrapolara para mayor cantidad de pasadas, puede deberse a la poca variabilidad de tamaño de partícula que presentan las muestras en la pasada 2 con respecto a la pasada 1.

3.4 Rendimiento

Como se ha definido en la Sección 1, para cada una de las experiencias realizadas, se clasifican las fracciones obtenidas como gruesos (retenidos en tamices N° 5 y

6), medios (retenidos en tamices N° 10, 12 y 25), y finos (retenidos en tamices N° 30 y ciego).

Los rendimientos de las moliendas representados para dicha segregación de los tamaños de partículas para cada experiencia se presentan en las Figs. 4, 5 y 6.

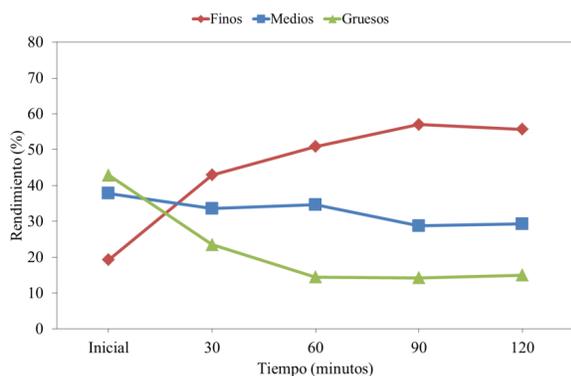


Fig. 4. Rendimiento porcentual para gruesos, medios y finos. Molino de Bolas.

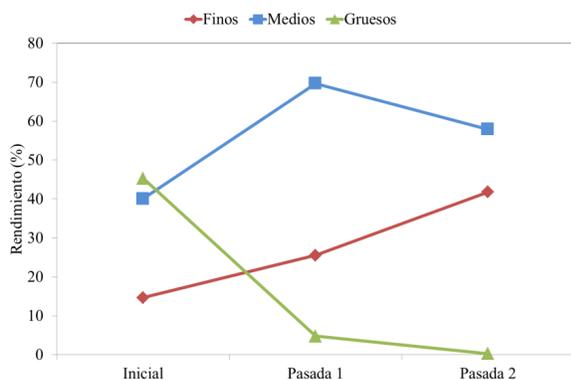


Fig. 5. Rendimiento porcentual para gruesos, medios y finos. Molino de Rodillos.

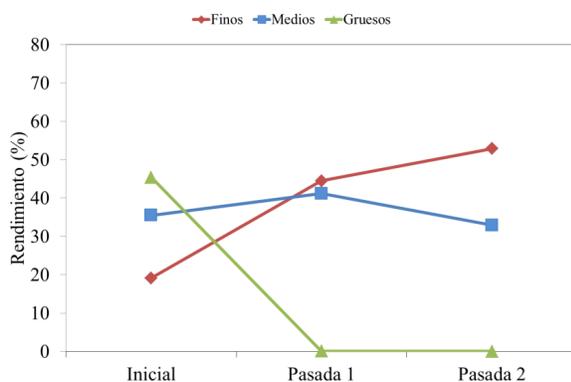


Fig. 6. Rendimiento porcentual para gruesos, medios y finos. Molino de Cuchillas.

Para los resultados obtenidos con el molino de bolas, no se observa una variación significativa más allá de los 60 minutos de operación, tal como se observa en la Fig. 4. Por lo tanto, un tiempo de molienda superior no refleja una mejora de calidad en el producto obtenido, aunque implica un aumento sustancial de la energía consumida, y consecuentemente del costo de operación.

Analizando los rendimientos del molino de rodillos (Fig. 5), se observa que la porción mayor pertenece a las partículas de tamaño medio, correspondiente a la fracción de interés. Por otra parte, se vislumbra que la proporción de gruesos luego de dos pasadas, registra un porcentaje menor al 1%, siendo insignificante con respecto a las demás fracciones.

Por último, estudiando la performance del molino de cuchillas (Fig. 6), se puede apreciar que la fracción de gruesos es nula al término de la primera pasada. Por otra parte, como la fracción de interés es la correspondiente a los tamaños medios, es óptimo realizar solamente una pasada con este molino, debido a que en la pasada siguiente el porcentaje de medios disminuye, como consecuencia del aumento considerable de la fracción de finos. Esto implica nuevamente un aumento del tiempo y costo de operación innecesario.

Conclusions

En el presente trabajo, se analiza la performance del proceso de molienda y tamizado de expeller de soja, subproducto de la extracción de aceite por el método de extrusado-prensado. En función de los valores de los coeficientes de ajuste obtenidos, se puede concluir que la correlación de Rosin, Rammler y Sperling permite predecir el comportamiento de la operación de molienda y tamizado frente a un amplio rango de escenarios operativos.

Analizando el comportamiento del molino de bolas, se puede observar que la performance del mismo es la menos adecuada para el objetivo deseado, debido a que produce una mayor porción de finos y gruesos, ocasionando una baja en las partículas medias (fracción de interés). Asimismo, el tiempo de operación de dicho molino es considerablemente mayor, lo que representa una desventaja adicional para su aplicación a escala industrial. Respecto a la energía por unidad de masa requerida para el proceso de molienda, se aprecia prácticamente constante luego de los 60 minutos. Asimismo, la variación que se observa

en el rendimiento para partículas medias luego de los 60 minutos de operación es despreciable (6%), con lo cual se concluye que operar el molino un tiempo mayor a los 60 minutos no mejorará la performance del mismo.

En relación a la performance del molino de rodillos, se observa que el mejor rendimiento se obtiene en la primera pasada, con un valor del 70% de partículas medias, percibiéndose que para la pasada posterior este valor se reduce. Con respecto al gasto energético, el trabajo calculado mediante Bond para este molino, ha arrojado en promedio valores 34 % mayores para las segundas pasadas que para las primeras. Por lo tanto, ambas perspectivas concuerdan que realizar dos pasadas no contribuye a mejorar las condiciones.

Observando los resultados obtenidos con el molino de cuchillas, se puede concluir que el modo óptimo de operación para dicho molino también es realizar una sola pasada de la muestra por el mismo, ya que en la segunda pasada la fracción de medios se ve reducida al igual que en el molino de rodillos. Los resultados obtenidos en el cálculo del trabajo de Bond para el molino de cuchillas, varían poco para las diferentes pasadas.

Efectuando una comparación entre los tres molinos y los distintos modos de operación empleados en cada uno, se puede concluir que el molino que desarrolla el menor rendimiento de la fracción de partículas de tamaño medio, es el molino de bolas con un valor del 35%, en contraposición a los otros dos molinos, que experimentan para esta misma fracción, un rendimiento bastante superior, cuando se los opera con una sola pasada (valores promedio de 55%). Además, se tiene en cuenta que el gasto energético por unidad de masa que realizan los tres molinos para todas las formas utilizadas, no desarrollan variación apreciable unos de otros (0.077 ± 0.025 kWh/ton).

En trabajos futuros, se prevé utilizar el expeller obtenido de dichas moliendas como materia prima para la elaboración de productos proteicos, mediante un proceso de escalado en planta piloto, tendiente a obtener aplicaciones de interés industrial. Se prevé realizar extracciones por separado con las tres fracciones descritas en el presente trabajo, para obtener así un análisis del comportamiento que desarrollan las mismas.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración y el financiamiento de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN),

del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), y de la Fundación del Nuevo Banco de Santa Fe en el marco de su programa de Becas de Innovación Tecnológica.

Referencias

- ASTM D422-63. (2007). *Método de análisis del tamaño de las partículas de suelo*.
- Baigorri, H., Salado Navarro, D. (2012). *El cultivo de soja en Argentina*. Argentina, Agroeditorial.
- Baudi Dergal, S. (2013). *Química de los alimentos* (Quinta Edición). México, Editorial Pearson.
- Bond, F.C. (1960). *Crushing and Grinding Calculations*. British Chemical Engineering, ISSN-0007-0424, 6 (1): 378-391.
- Cortazar-Figueroa, L. M., Meléndez-Pérez, R., Oliver-Hernández, D. M. (2008). Energy consumption and size distribution in the grinding of cinnamon and black pepper. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 7, 123-130.
- Cruz-Salgado, J., Alonso-Romero, S., Estrada-Monje, A., Zitzumbo-Guzman, R. (2016). Optimización de propiedades mecánicas de un compuesto de pet/madera mediante diseño de experimentos para mezclas. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 15, 643-654.
- Duda, W. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento*. p. 73. Editorial: Técnicos Asociados, S.A. Barcelona, España.
- Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E. (2010). *Multivariate Data Analysis*. seventh ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs
- Konwinski, A. (1992). *Process for making soy protein concentrate*. Patente US 5.097.017.
- Kutuk, S. (2016). Influence of milling parameters on particle size of ulexite material. *Powder Technology* 301, 421-428.
- Ocampo Ramírez, A., Hernández Gómez, L. H., Urriolagoitia Sosa, G., Fernández Valdés, D., Cervantes Beyra, R., Fernández Valdés, D. (2015). Diseño de un molino para reciclar pastas de freno de tracto-camiones usando el método de bond. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 24, 45-51.

- Olguín-Arteaga, G.M., Amador-Hernández, M., Quintanar Guzmán, A., Díaz-Sánchez, F., Sánchez-Ortega, I., Castañeda-Ovando, A., Avila-Pozos, R., Santos-López, E.M. (2015). Correlación de entalpías de gelatinización con los índices de absorción de agua y de sólidos solubles en agua de sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14, 303-310.
- Russin, T., Arcand, Y., Boye, J.I. (2007). Particle size effect on soy protein isolate extraction. *Journal of Food Processing and Preservation* 31, 308-319.
- Sunley, N. (1995). Soya Protein Isolate Production by various methods. Tesis de Maestría. Durban, Departamento de Química aplicada, Universidad de Natal.
- Tirado-Gallegos, J.M., Zamudio-Flores, P.B., Ornelas-Paz, J. de J., Rios-Velasco, C., Acosta-Muñiz, C.H., Gutiérrez-Meraz, F., Islas-Hernández, J.J., Salgado-Delgado, R. (2016). Efecto del método de aislamiento y el estado de madurez en las propiedades fisicoquímicas, estructurales y reológicas de almidón de manzana. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 15, 391-408.
- Vian, A., Ocón, T. (1952). *Elementos de Ingeniería Química*, Colección Ciencia y Técnica. Aguilar. España.
- Wang, Y., Zhang, Z., Xu, Y., Xi, Y. (2007). Tensile Fracture Simulation in Rock Using Augmented Virtual Internal Bond Method. *Mechanics and Its Applications in Civil, Mining and Petroleum Engineering*, ISBN-978-0-7844-1339-5, pp. 13-19, Ed. American Society.