



**CONSUMO DE ENERGÍA Y DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN LA
MOLIENDA DE CANELA (*Cinnamomum zeylanicum*)
Y PIMIENTA NEGRA (*Piper nigrum* L)**

**ENERGY CONSUMPTION AND SIZE DISTRIBUTION IN THE GRINDING OF
CINNAMON (*Cinnamomum zeylanicum*) AND BLACK PEPPER (*Piper nigrum* L)**

L. M. Cortazar-Figueroa*, R. Meléndez-Pérez y D. M. Oliver-Hernández

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Campo 1. Cátedra de Ingeniería Alimentaria. Av. 10 de mayo s/n. Col. Infonavit Centro. 54740, Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx.

Recibido 9 de Julio 2007; Aceptado 3 de Junio 2008

Resumen

Se realizó la molienda de canela y pimienta negra comparando el consumo de energía y la distribución de los tamaños de partícula obtenidos. Se llevó a cabo en 3 molinos con diferentes fuerzas de aplicación. Se controlaron los diámetros iniciales de ambas especias y la velocidad de alimentación permaneció constante: 35.84 kg/h (sd $\pm$ 0.03), colocando a la salida de los molinos una malla de diámetro constante de 2 mm, el consumo de energía real se evaluó midiendo la intensidad de corriente y a los productos obtenidos de la molienda se les efectuó un análisis granulométrico. Los diámetros más pequeños se obtuvieron en el molino Pulvex; para canela fueron 0.31 mm (sd $\pm$ 0.007) y 0.32 mm (sd $\pm$ 0.016) para 17.22 y 18.56 mm de diámetros iniciales respectivamente y para pimienta 0.45 mm (sd $\pm$ 0.002) y 0.47 mm (sd $\pm$ 0.009) para 3.75 y 7.84 mm en la alimentación. El consumo de energía fue menor para pimienta de 0.98 y 0.96 Wh/kg en el Pulvex y para canela 2.30 y 2.28 Wh/kg en el molino de cuchillas.

Se puede concluir que la aplicación de fuerzas de impacto y cizalla permite obtener productos más homogéneos y facilita la molienda de las especias estudiadas.

Palabras clave: consumo de energía, distribución de tamaño, molienda.

Abstract

The grinding of cinnamon and black pepper was carried out for the determination of energy consumption and particle size distribution. It carried out in three different mills with different forces. The initial diameters were controlled for both spices and the feeding speed stayed constant: 35.84 Kg/h (sd $\pm$ 0.025). In the exit of the mills there was a mesh with a constant diameter of 2 mm; the real energy consumption was evaluated measure the current intensity, the obtained products of the grinding carried out themselves a Sieve Analysis. The smallest diameters were obtained in the Pulvex mill; for the cinnamon were 0.31 mm (sd $\pm$ 0.007) and 0.32 mm (sd $\pm$ 0.016) for the initial diameter 17.22 and 18.56 mm respectively and the pepper 0.45 mm (sd $\pm$ 0.002) y 0.47 mm (sd $\pm$ 0.009) for 3.75 y 7.84 mm of initial diameter respectively. The energy consumption was little for the pepper in the Pulvex 0.98 and 0.96 Wh/kg and for the cinnamon were 2.30 and 2.28 Wh/kg in the mill of blades.

To conclude, the application of impact and shear forces permit to obtain homogeneous products and facilitate the grinding of the studied spices.

Keywords: energy consumption, grinding, size distribution.

1. Introducción

La reducción de tamaño, o molienda de especias para la producción de materiales granulares está determinada por muchos factores entre los que se encuentran el tamaño inicial, la forma de la partícula y sus características de friabilidad o tendencia a la ruptura. (Indara y Bhattacharya, 2006).

Desde el punto de vista operativo, la reducción de tamaño, refleja una baja eficiencia en el

consumo de energía debido a que la mayor parte de ésta se desprende como calor al interior del molino provocando una pérdida de calidad principalmente en especias. (Fellows, 1994; McCabe y col., 1999; Geankoplis, 2005).

Como se sabe, la molienda es una operación unitaria que reduce el volumen promedio de las partículas sólidas al dividir y/o fraccionar una muestra sólida, implica solo una transformación

* Autora para la correspondencia. E-mail: lauracortazarf@prodigy.net.mx.
Tel: 56 23 20 74, Fax: 56 23 20 25

física que debe conservar las características de la materia prima inicial.

Se pueden emplear molinos que aplican fuerzas preponderantes de impacto, cizalla o la combinación de ambas. La forma en que se aplica la fuerza depende de su magnitud, dirección y velocidad, permitiendo que las partículas la absorban en forma de tensión, produciendo una deformación en su estructura y cuando se sobrepasa este límite, es entonces que el material se fractura produciendo nuevas superficies. Cada nueva superficie requiere determinada cantidad de energía para seguir fracturándose hasta que la partícula presente un tamaño menor al inicial obteniéndose distribuciones de tamaño que incluyen partículas gruesas, medianas y finas (Fellows, 1994; McCabe y col., 1999; Geankoplis, 2005). La cantidad de energía necesaria está en función del tamaño inicial y final, de la fuerza aplicada y de las características iniciales del material a moler, a esto se agrega una serie de factores que limitan la reducción de tamaño como es el contenido de humedad, el contenido de grasas o aceites y la forma geométrica (Indara y Bhattacharya, 2006). Esta última se debe considerar ya que las especias en general presentan diversas formas geométricas y de esto dependerá la forma en que el producto se reduzca al interior de los molinos.

La pimienta a utilizar presenta una forma esférica que al ser triturada, el valor de tensión es mínimo en todos los puntos por lo que se requieren fuerzas superficiales de ruptura diferentes a las aplicadas a una forma cilíndrica conformada por láminas como en el caso de la canela, donde la superficie media es más curvada por lo tanto bajo la aplicación de fuerzas externas en la molienda, se presentará un predominio de flexión y/o deformación inicial, antes de la reducción en sí de tamaño, implicando requerimientos energéticos diferentes, amén de las características de composición del material y de la forma de aplicación de la reducción de tamaño. Es por eso que se buscaron dos especias con diferente forma y estructura para su comparación durante su molienda.

Dentro de las especias más importantes que son sometidas a molienda se encuentran la canela y la pimienta. La canela es una de las especias más famosas y apreciadas en gastronomía, utilizada comúnmente para sazonar alimentos y que se caracteriza por su fuerte aroma, su sabor dulce y pungente. Su uso como infusión está muy extendido en México y zonas de influencia y compite en uso con otras bebidas calientes, como el café y el chocolate además, el producto en polvo puede agregarse tanto a platos dulces como salados. Esta es la corteza del árbol de la familia de las lauráceas; que se corta en tiras, se seca y se enrolla en varas; su contenido de aceite volátil es de 0.9 a 2.3 % dependiendo de la variedad (Farell, 1985; Gerhart, 1975; Grenis y Tamter, 1996).

La pimienta negra es de las especias más importantes a nivel mundial ya que se utiliza

prácticamente en todos los platillos, salvo en los productos de panadería-pastelería. Su empleo es universal en salsas, extractos, carnes procesadas, carnes de aves, rellenos y pastas. La pimienta negra es un fruto con forma esférica, pequeña, de superficie rugosa y de dureza media, su contenido de aceite volátil es del 2% (Farell, 1985; Grenis y Tamter, 1996).

La reducción de tamaño se ha evaluado desde diferentes enfoques como son: la evaluación del consumo de energía para la determinación de las constantes en el uso de las Leyes de Kick, Rittinger y Bond para una velocidad de alimentación dada, así como su comparación con otros modelos. Y desde otro punto de vista, estudios relacionados con el decremento de calidad. (Singh y col., 1999; Manohar y Sridhar, 2001; Goswami y Singh, 2003; Raghavendra y col., 2006). Sin embargo poco se ha trabajado en los aspectos operativos de la molienda sobre el consumo de energía, aspecto de suma importancia ya que repercutirá directamente en los costos operativos, es por eso que el objetivo de este trabajo fue comparar el consumo de energía requerido por tres equipos experimentales con principio de aplicación de fuerza distinta (cizalla, impacto y la combinación de ambas) en las dos especias con dos diferentes tamaños iniciales, así como el efecto en la distribución de tamaños final y en el diámetro final asignado.

2. Metodología experimental

Se emplearon dos especias; canela (*Cinnamomum zeylanicum*) y pimienta negra (*Piper nigrum* L.) adquiridas en la Central de Abastos del Distrito Federal, México. Ambas especias se trabajaron con dos tamaños iniciales de partícula cuya determinación se explica en la sección posterior y con humedades menores al 12% para evitar aglomeración de partículas durante la molienda (canela con 8.9% y pimienta 7.4%) (Farell, 1985; Fellows, 1994; Grenis y Tamter, 1996). Cada corrida experimental se realizó por cuadruplicado, para dar mayor confiabilidad a los resultados.

2.1. Molienda

La experimentación se llevó a cabo en el Laboratorio Experimental Multidisciplinario de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, en las áreas de Posgrado y Tecnología de Alimentos empleándose los siguientes molinos: el Molino de cuchillas (MC) de cuatro martillos en forma de barras con bordes cortantes fijos al rotor y seis cuchillas fijas distribuidas en la carcasa indicado en la Fig. 1a, que aplican fuerza de cizalla, con motor de 1.08 KW de potencia. La Fig. 1b corresponde al Molino de martillos colgantes (MM) de ocho martillos colgantes en forma de barras con extremos planos unidos a un eje rotor, distribuidos en la parte superior e inferior del mismo. Los martillos al hacer

contacto con el material aplican fuerzas de impacto y cuenta con un motor de 1.3 KW. Y el Molino Pulvex, Fig. 1c, con seis martillos dentados y fijos al eje rotor que permiten la reducción del material al aplicar la combinación de fuerzas de impacto y cizalla; el motor del Pulvex es de 1.61 KW.

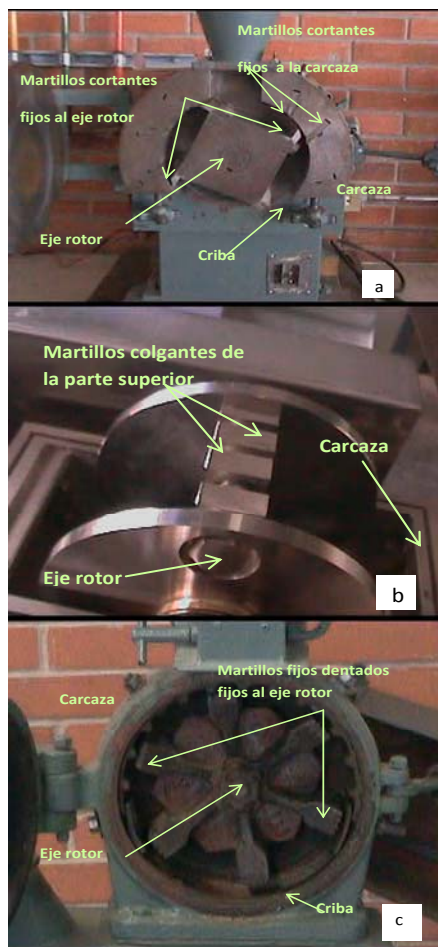


Fig. 1. Parte interna de (a) Molino de Cuchillas (MC); (b) Molino de Martillos (MM) y (c) Pulvex.

2.2. Tamaño inicial

Cuando las partículas presentan formas geométricas con dos dimensiones características como el cilindro, en el caso de la canela, el tamaño inicial de partícula se puede definir considerando un diámetro equivalente que promedie tanto la longitud como el diámetro. Para la experimentación las varas se cortaron en 2 longitudes diferentes y se determinó el diámetro equivalente con la Ec. (1) (Koichi y col., 1991).

$$D_c = \frac{4b + 2a}{2a + 2b} [=] \text{mm} \quad (1)$$

Donde D_c es el diámetro equivalente geométrico de la canela (mm); b es la mitad de la longitud (mm) y a la mitad del diámetro en (mm).

Para establecer el valor del diámetro empleado en la experimentación, se midió con un Vernier digital el diámetro de las varas de canela a trabajar en una muestra de 2 kg y se construyó un histograma, Fig. 2, de los diámetros determinados contra la frecuencia y a partir de esto se calculó a .

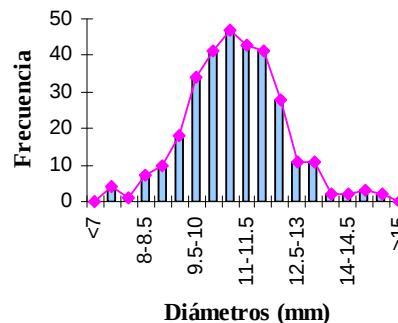


Fig. 2. Histograma de canela para la selección del diámetro a empleado en la experimentación.

Se realizó un tamizado a 2 kg de pimienta negra empleando cuatro mallas con las siguientes aberturas: 1.71, 5.79, 9.9 y 13.7 mm. El diámetro de partícula del tamizado de se determinó con la Ec. (2), (Koichi y col., 1991; Singh y Goswami, 2004).

$$D_p = \frac{a_1 + a_2}{2} [=] \text{mm} \quad (2)$$

Donde D_p es el diámetro inicial de la pimienta, (mm); a_1 es la abertura de la malla que deja pasar las partículas, (mm) y a_2 es la abertura de la malla que retiene las partículas, (mm).

La molienda se efectuó bajo las siguientes condiciones: la cantidad de material empleado para cada corrida fue de 150 g (± 0.32); la velocidad de alimentación permaneció constante de 35.85 kg/h (± 0.03) y se colocó una criba de diámetro constante de 2 mm a la salida de los molinos, provocando una molienda sofocada.

2.3. Determinación de la potencia y energía requerida para la molienda.

La energía requerida para la molienda se determinó con la Ec. (3) (Geankoplis, 2005)

$$E = \frac{P_c - P_0}{T} [=] \frac{\text{Wh}}{\text{kg}} \quad (3)$$

Donde E es la energía necesaria para realizar la molienda, (Wh/kg); P_c es la potencia consumida por el molino durante la molienda, (W); P_0 es la potencia consumida sin carga, (W) y T la velocidad de alimentación durante la molienda, (kg/h).

Para obtener los valores de P_c y P_0 se determinó el voltaje y la intensidad de corriente al encendido de los equipos y durante la molienda con un Multímetro de gancho, utilizándose la Ec. (4) (Resnick y col., 1999)

$$P = VI [=] \text{W} \quad (4)$$

Donde P es la potencia necesaria para realizar la molienda (W); I es la intensidad de corriente eléctrica, (A) y V es el voltaje de la corriente eléctrica, (V).

2.4. Separación de tamaños

Las muestras obtenidas de la molienda se tamizaron con un equipo para agitación Ro-tap, empleando tamices de serie no rigurosa US, y mallas 30, 45, 50, 60, 70 y 80. El tamizado fue realizado con 100 g (± 0.45) del material molido y se agitó durante 10 min.

El análisis granulométrico se realizó a partir de los gráficos diferenciales determinándose la distribución de tamaños y los gráficos acumulativos para definir los diámetros medios de las partículas a partir del 50% y 80% del producto pasado a través de los tamices.

Con la Ec. (5) se determinó el diámetro medio Sauter que considera el volumen promedio por unidad de superficie. Se eligió este diámetro medio ya que es de los más utilizados en ingeniería además de que garantiza la consideración del área y el volumen de la partícula que se pudiera requerir en aplicaciones posteriores como el secado, congelación, etc. (Helman, 1984)

$$Dp_{Sau} = \frac{\sum x_i}{\sum \frac{x_i}{dp_i}} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{dp_i}} \quad (5)$$

donde Dp_{Sau} es el diámetro medio Sauter, (mm); $\sum x_i$ es la sumatoria del peso retenido de las partículas en cada malla; $\sum x_i/dp_i$ sumatoria del peso retenido de las partículas entre el diámetro correspondiente al promedio de las aberturas de mallas que pasa y que retiene.

2.5. Análisis estadístico

Se utilizó el Software MINITAB 13 y 14, para la aplicación de la estadística descriptiva en los pesos de las muestras antes de efectuar la molienda, para las muestras tamizadas y en la velocidad de alimentación; Análisis de Bloques Aleatorios en la comparación de las velocidades de alimentación; Análisis Factorial para la comparación entre molinos y especias del consumo de energía y los diámetros medios finales (Walpole y col., 1998) y Análisis de Varianza para la comparación entre diámetros

medios finales, en los casos donde se encontraron diferencias significativas se aplicó la prueba de Tukey para comparación de medias, como pruebas de *a-posteriori*.

3. Resultados y discusión.

Para establecer el tamaño inicial de la canela, se utilizaron los valores de los diámetros medidos en 2 kg iniciales de materia prima, encontrándose en el histograma de frecuencia Fig. 2 que el mayor valor se presentó en el intervalo de 10.5 a 11 mm; se definió que las dos longitudes a trabajar eran las de 40 y 60 mm, para así obtener los dos tamaños iniciales de partícula de 17.22 y 18.56 mm.

Los dos diámetros iniciales utilizados para la pimienta negra fueron: 3.75 y 7.84 mm, al haber utilizado la Ec. (2).

3.1. Consumo de energía y potencia

Durante la molienda de canela y pimienta negra se obtuvieron los resultados de consumo de potencia y de energía presentados en la Tabla 1 y los resultados estadísticos en la Fig. 3 donde se incluye la dispersión de los datos con las áreas de los rectángulos, las medidas de tendencia central para los dos tamaños iniciales de partículas, 1, 2.

Para la canela, se establece que el tamaño inicial de las partículas no influye en ninguna de las dos variables de respuesta en cada molino, al no presentar diferencias significativas al hacer las comparaciones respectivas, sin embargo, existe poca diferencia en los valores medios del consumo de energía del MM al compararse con los otros molinos.

El menor consumo de energía para la molienda de canela se obtuvo en el MC siendo poca la diferencia respecto a los obtenidos en el Pulvex para ambos tamaños iniciales. Los valores de la energía consumida se encuentran en un intervalo de confianza al 95% del $2.35 \leq \mu \leq 3.36$ Wh/kg Se presenta un incremento en el consumo de energía del 69% y 82.2% respectivamente para cada diámetro inicial al comparar MC con MM y 44% y 53% al comparar el Pulvex contra el MM. Entre el MC y el Pulvex existe una diferencia del 18.2%.

Tabla 1. Comparación del consumo de potencia y energía para canela y pimienta molidas.

Equipo	Canela			Pimienta		
	D inicial (mm)	P (W)	E (Wh/Kg)	D inicial (mm)	P (W)	E (Wh/Kg)
(MC)	D _{c1}	78.92	2.30	D _{p1}	66.78	1.91
	D _{c2}	78.92	2.27	D _{p2}	221.42	6.00
(MM)	D _{c1}	139.64	3.89	D _{p1}	359.99	10.67
	D _{c2}	145.71	4.15	D _{p2}	359.99	10.58
Pulvex	D _{c1}	97.14	2.70	D _{p1}	35.35	0.97
	D _{c2}	97.14	2.70	D _{p2}	35.35	0.95

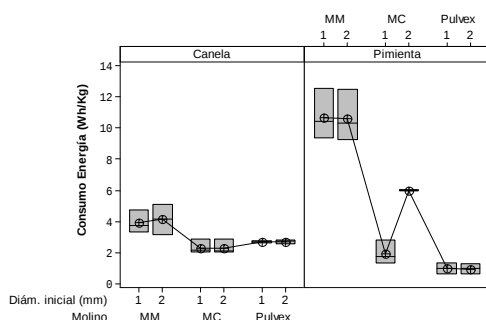


Fig. 3. Resultados estadísticos para la comparación del consumo de energía entre molinos y especias.

$D_{c1} = 17.22\text{mm}$, $D_{p1} = 3.75\text{ mm}$, $D_{c2} = 18.56\text{mm}$ y $D_{p2} = 7.84\text{ mm}$.

El consumo de energía para la molienda de pimienta en los molinos MM y el Pulvex no se ve afectado por el diámetro inicial (D_p) al hacer las comparaciones estadísticas correspondientes, sin embargo si existe una diferencia significativa ($P < 0.05$) en el MC ya que con mayor diámetro inicial, se requiere más energía para provocar aproximadamente el mismo aumento en el área superficial de las partículas considerando que el diámetro de la malla colocada a la salida del molino se mantuvo constante. Analizando el consumo de potencia y energía requeridas en la molienda de la pimienta negra se observó una diferencia significativa en el MM con respecto a los otros dos molinos, con un promedio de 10.6 Wh/kg en comparación de 4 y 0.96 Wh/kg respectivamente para MC y Pulvex. Como se puede ver los menores consumos de energía se obtuvieron de la molienda en el Pulvex para ambos diámetros iniciales. El incremento de energía para moler pimienta con diferente diámetro inicial en el MC fue de 32.7%. Al comparar la energía del MC y el MM existió un incremento del 17% y 56.7% respectivamente para los dos diámetros iniciales, para el Pulvex y el MM el incremento fue de 110% para ambos diámetros y para el Pulvex con respecto al MC este fue de 96% y 31%.

Si se compara el consumo de energía necesaria para las dos especias (véase la Fig. 3) se observa que se obtuvieron los menores consumos para la canela en comparación con la pimienta negra en los molinos MC (1.91 y 6 Wh/kg) y MM (10.67 y 10.58 Wh/kg) representando una diferencia del 60%, sin embargo para el caso del Pulvex (0.96 Wh/kg) es la pimienta la que presentó los menores consumos aunque la diferencia es poco significativa como se puede observar en el diámetro inicial menor no así en el mayor.

3.2. Distribución del tamaño de partícula

Los productos obtenidos de la molienda de especias para los tres molinos se presentan en los gráficos diferenciales de la Fig. 4.

El MC y el MM presentaron comportamientos granulométricos similares, que están en función de la forma y características de cada partícula; en el caso de la canela, con distinto diámetro inicial (D_c) se presentan curvas más amplias indicando heterogeneidad en la distribución de tamaños finales, mientras que las curvas de pimienta presentaron mayor tendencia a las partículas gruesas, con valores más altos en el extremo derecho de los gráficos (a) y (b).

Los comportamientos granulométricos de la pimienta y canela molidas en el Pulvex se presentan en la Fig. 4c, aquí las curvas para pimienta son más estrechas que las obtenidas de la molienda de la canela, también se puede observar que entre más pequeño sea el diámetro de la pimienta más homogéneo es el producto obtenido.

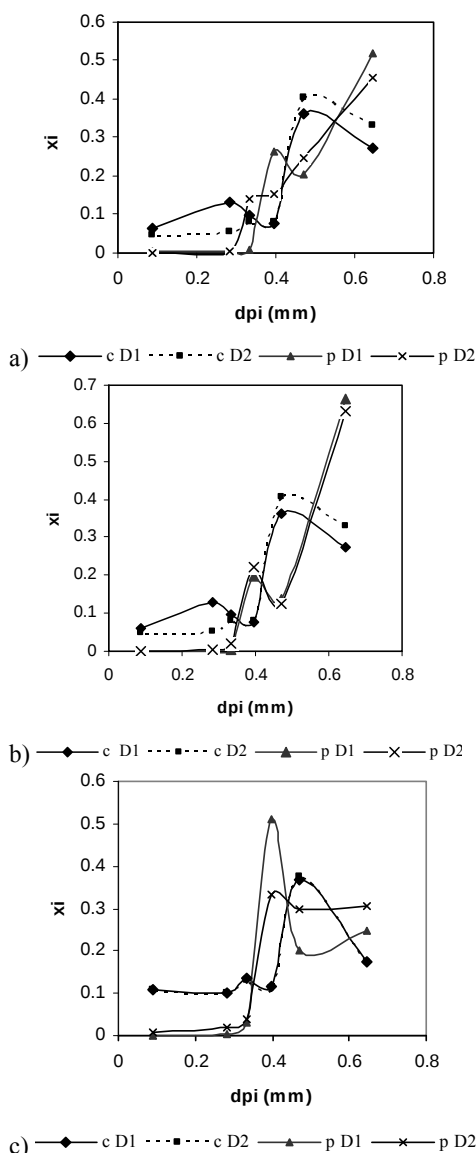


Fig. 4. Curvas de distribución de tamaño para canela y pimienta negra molidas (a) Molino de Cuchillas (MC), (b) Molino de Martillos (MM) y (c) Pulvex.

En general, se observó que no se presenta diferencia en el comportamiento granulométrico cuando el tamaño inicial de la especia varía; sin embargo este cambia dependiendo de la forma de las partículas (cilíndrica y esférica) y de la forma y tipo de fuerza que es aplicada al material para reducirlo de tamaño (los diferentes principios de aplicación de fuerza).

Los diámetros que se determinaron en los gráficos acumulativos de la Fig. 5 fueron el 50% y 80% de la fracción total pasada (ftp) a través de los tamices. Las lecturas de estos diámetros se realizaron tomando en el eje de las ordenadas las fracciones 0.5 y 0.8 respectivamente e interceptándolas con la curva de cada producto, para así leer el valor del diámetro en el eje de las abscisas. Además se calculó, a partir de la Ec. (5), el diámetro medio Sauter (D_{pSau}).

En la Tabla 2 se muestran los diámetros obtenidos de la canela y pimienta molida para los dos tamaños iniciales. Se puede observar en esta tabla que los diámetros medios para la canela tienen un comportamiento similar entre los molinos siendo menores los diámetros obtenidos de la molienda en el Pulvex. En el caso de la pimienta los menores diámetros se presentan para el Pulvex y los mayores en el MM.

Tabla 2. Diámetros a 50 y 80% de fracción total pasada y diámetro medio Sauter.

Canela				
Equipo/ diámetro (mm)		MC	MM	Pulvex
50% ftp	D_{c1}	0.307	0.318	0.307
	D_{c2}	0.321	0.326	0.308
80% ftp	D_{c1}	0.404	0.403	0.337
	D_{c2}	0.424	0.425	0.337
D_{pSau}	D_{c1}	0.356	0.386	0.312
	D_{c2}	0.395	0.395	0.311
Pimienta				
Equipo/ diámetro (mm)		MC	MM	Pulvex
50% ftp	D_{p1}	0.352	0.354	0.303
	D_{p2}	0.351	0.351	0.289
80% ftp	D_{p1}	0.494	0.522	0.365
	D_{p2}	0.424	0.516	0.413
D_{pSau}	D_{p1}	0.511	0.560	0.447
	D_{p2}	0.496	0.518	0.471

$D_{c1}=17.22\text{mm}$, $D_{c2}=18.56\text{mm}$, $D_{p1}=3.75\text{ mm}$, $D_{p2}=7.84\text{ mm}$.

Al compararse los dos materiales se observa que se alcanzaron menores diámetros finales para la canela en comparación de la pimienta; debido a que la canela es un material fibroso y se puede molturar con mayor facilidad.

En el análisis estadístico se muestra mayor diferencia entre los diámetros iniciales en pimienta que en canela cuando se comparan los diámetros obtenidos de la molienda en el Pulvex, mientras que para el MM y el MC existe diferencia poco

significativa para los diámetros de la canela, mientras que para pimienta estos resultaron mayores. Estas diferencias son claras en la Fig. 6.

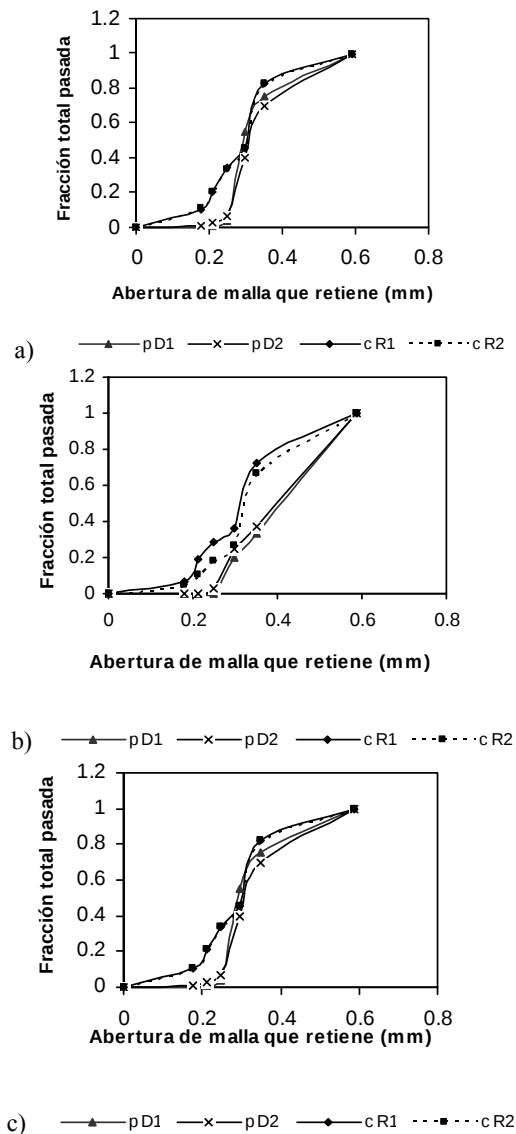


Fig. 5. Curvas acumulativas para canela y pimienta negra molidas (a) Molino de Cuchillas (MC), (b) Molino de Martillos (MM) y (c) Pulvex.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos de los diferentes diámetros para un mismo molino y especia se realizó un Análisis de Varianza cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.

El análisis estadístico muestra que existe una diferencia significativa entre la asignación de los diámetros.

Con el fin de establecer estas diferencias se presenta la Fig. 7 en donde se observa que los valores de 80% ftp y D_{pSau} son similares y que estos son muy diferentes al 50% ftp. Esto muestra la importancia de seleccionar adecuadamente el diámetro medio asignado a una población y para esta

experimentación no sería adecuado tomar el 50% ftp ya que no representa adecuadamente al material.

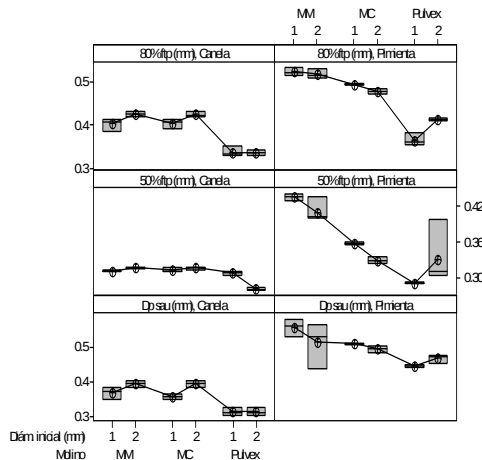


Fig. 6. Resultados estadísticos para la comparación de los diferentes diámetros medios obtenidos entre especias y molinos.

Tabla 3. Tabla de Análisis de Varianza para la comparación entre diámetros finales asignados, 50% ftp, 80% ftp y Dp_{Sau} .

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	0.283	0.141	36.22	0
Error	141	0.601	0.004		
Total	143	0.892			

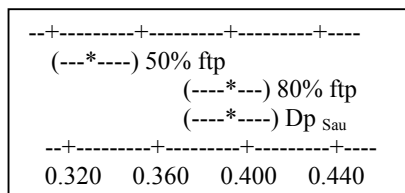


Fig. 7. Resultados obtenidos de la Prueba a posteriori de Tukey.

Conclusiones.

De los resultados obtenidos se puede concluir que la cantidad de consumo de energía que se requiere para molinar canela y pimienta negra depende de las características de estas especias, en específico la resistencia a la molienda más importante es la dureza como se demostró por la diferencia de consumo y tamaño final obtenido para la pimienta en comparación con la canela. Es muy importante, por lo tanto, elegir adecuadamente el principio operativo del equipo de reducción de tamaño.

Los materiales fibrosos como la canela pueden ser reducidos de tamaño con fuerzas de cizalla, como en el caso del MC permitiendo obtener productos finos y con bajos consumos de energía (2.30 y 2.28 Wh/Kg.), mientras que los materiales con cierto grado de dureza como la pimienta se pueden molinar aplicándoles la combinación de

fuerzas de impacto y cizalla como el que presenta el molino Pulvex obteniéndose productos homogéneos, finos y con bajos consumos de energía (0.98 y 0.96 Wh/Kg.).

Cuando se moluraron dos tamaños iniciales de partícula se observó que el comportamiento granulométrico y el diámetro final no presentaron variación significativa principalmente en la canela. En el caso de la pimienta para el molino de cuchillas el diámetro inicial si presentó diferencia significativa, es decir para este equipo es importante el tamaño que presenta la partícula de alimentación.

Debido a la diferencia significativa que se presentó se determinó que el diámetro del 50% de la fracción total pasada no representa a la población, siendo más representativos el diámetro del 80% de la ftp y el Dp_{Sau} .

En la molienda del Pulvex se obtuvieron las partículas con menores diámetros Sauter, para canela fueron de 0.31 y 0.32 mm para 17.22 y 18.56 mm respectivamente y para pimienta negra de 0.45 y 0.47 mm para 3.75 y 7.84 mm de diámetro inicial respectivamente.

Como conclusión final, la fuerza de cizalla se puede aplicar a materiales fibrosos, requiriendo bajos consumos de energía como el MC y para los materiales esféricos y con cierta dureza se puede aplicar la combinación de fuerzas de impacto y cizalla que presenta el Pulvex. Aunque este último equipo también resultó efectivo para la canela.

Definiendo la eficiencia de molienda con respecto a la obtención de productos homogéneos y bajo costo de potencia, el molino Pulvex es el que cumple con estos parámetros para ambas especias.

Los resultados anteriores evidencia la importancia de continuar el estudio de esta operación sobre todo en los aspectos de consumo de energía, la predicción de la misma y la influencia de las diferentes características del material en las variables operativas del equipo.

Referencias

- Farrell, K.T. (1985). *Spices, Condiments and Seasonings*. The AVI Publishing Company, Inc., Florida, 80 - 85, 175 -185.
- Fellows, P. (1994). *Tecnología y procesamiento de los alimentos, Principios y prácticas*. Acribia, Zaragoza, 73-83.
- Geankoplis, C.J. (2005). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3a ed., CECSA, México, 928-933.
- Gerhart, U. (1975). *Especias y condimentos*, Acribia, Zaragoza, 101-116.
- Goswami, T. K., Singh M. (2003). Role of feed rate and temperature in attrition grinding of cumin. *Journal of Food Engineering* 59, 285-290.
- Grenis, A., Tamter D. R. (1996). *Especias y aromatizantes alimentarios*. Acribia, Zaragoza, 11-21, 67-70, 117-123.

- Helman, J. (1984). *Farmacotecnia teórica y práctica*. Tomo IV, CECSA, México, 1147-1185.
- Indara, T.N., Bhattacharya S. (2006). Grinding characteristics of some legumes. *Journal of Food Engineering* 76, 113-118.
- Koichi, I., Gotoh, K., Higashitani, Ko, (1991). *Powder Technology Handbook*. Marcel Dekker Inc., New York, 3-14.
- Manohar B., Sridhar B. S. (2001). Size and shape characterization of conventionally and cryogenically ground turmeric (*Curcuma domestica*) particles, *Powder Technology* 120, 292-297.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriot, M. (1999). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 4a ed., McGraw-Hill Interamericana de España, Madrid, 890-924.
- Resnick, R., Halliday, D., Krane, K. S. (1999). *Física*, 4a ed., CECSA, México, 933.
- Singh A., Hung Y. C., Phillips R. d., Chinnan M.S., McWatter K. H. (2004). Particle – size Distribution of cowpea flours affects quality of akara (fried Cowpea Paste), *Journal of Food Science* 69, S243-S249.
- Singh K. K., Goswami T.K. (1999). Design of cryogenic grinding system for spices, *Journal of Food Engineering* 39, 359-368.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, Sharon L. (1998). *Estadística para Ingenieros*. 6a ed., Pearson Educación, México, 527-555.