

LA VÁLVULA-S: MODELADO DEL FLUJO DE SÓLIDOS GRANULARES UTILIZANDO NÚMEROS ADIMENSIONALES

THE S-VALVE: MODELING GRANULAR SOLIDS FLOW USING DIMENSIONLESS NUMBERS

F. Santoyo², G. Guatemala², I. Orozco² y E. Arriola^{1*}

¹Departamento de Ingeniería Química, CUCEI, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.

²Unidad de Tecnología Agroalimentaria. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ, A.C.). Guadalajara, Jalisco, México.

Recibido 11 de Agosto 2009; Aceptado 11 de Marzo 2010

Resumen

En este trabajo se utilizó el método Pi-Buckingham para obtener un modelo matemático simple que prediga el flujo de sólidos en un novedoso dispositivo de control conocido como Válvula-S (o válvula que escupe). Los parámetros del modelo son: el diámetro de los sólidos (arroz, café verde y lenteja), su densidad, el diámetro relativo del conducto horizontal de la válvula, la presión de operación y la velocidad superficial del aire. Se usaron dos prototipos de válvula-S construidas con tubo de acrílico de 0.04 y 0.02 m de diámetro. Los experimentos se llevaron a cabo a temperatura ambiente y con dos presiones de operación de 7 y 8×10^5 Pa. El modelo obtenido predice razonablemente el comportamiento del sistema para los sólidos granulares utilizados (85% para café, 97 % para lenteja y 98% para arroz).

Palabras clave: válvula-S, flujo de sólidos granulares, números adimensionales, Pi-Buckingham, modelado matemático.

Abstract

In this work, Pi-Buckingham Method of Dimensional Analysis was used to obtain a simple mathematical model to predict flow of solids from a novel control valve known as "S-valve" or "spitting valve". Parameters of the model were: particle diameter and density (rice, green coffee beans and lentil), relative diameter of the horizontal section of the valve, system operation pressure and air superficial velocity. Two S-valves prototypes, built in acrylic pipe of 0.04 and 0.02 meters diameter, were used. The experiments were run at room temperature and at two operation pressures of 7 and 8×10^5 Pa. For the grains we used, the obtained model fit experimental data reasonable well (98% for rice, 85% for green coffee beans, and 97% for lentil).

Keywords: S-valve, solids flow rate, dimensionless numbers, Pi-Buckingham, mathematical modeling.

1 Introducción

En muchas operaciones agroindustriales, los sólidos granulares necesitan ser recogidos, transportados, descargados y/o transformados; para ello, se emplean diversos sistemas entre los que destacan, cintas transportadoras, cangilones, sistemas hidráulicos, transportes vibratorios y sistemas neumáticos entre otros (Aragón, 2002). La "Válvula-S" o "spitting valve" (en

inglés significa "válvula que escupe" o "válvula escupidora"), se utiliza en operaciones en las que se requiere transporte, alimentación, dosificación y/o descarga de sólidos granulares, tales como semillas y granos (Arriola, 1997; Arriola *y col.*, 2004).

El objetivo de un sistema de transporte y/o control neumático de flujo es transportar y/o controlar flujos de granos y semillas a granel por

* Autor para la correspondencia. E-mail: arriole@hotmail.com

medio de un flujo de gas que opera a presión. De acuerdo con Melo (2009), una mínima mejoría en el proceso de manipulación de los sólidos granulares aportaría grandes beneficios, en virtud de que tiene que existir un equilibrio económico entre los gastos de inversión y de operación del sistema. El modelado de flujos bifásicos gas-sólido y el cálculo de la pérdida de presión no es una tarea sencilla debido a la compleja relación sólido-aire que fluye a través de la tubería, aunado a las diferentes concentraciones en peso de la mezcla (Hua *y col.*, 2002; Huang *y col.*, 1995).

La descarga y control de flujo de los sólidos que provienen de diversos procesos debe ser una operación simple y eficiente; es deseable que el dispositivo utilizado para ello no tenga partes móviles en contacto con los sólidos y que sea mecánicamente simple (Geldart y Jones, 1991). Diversas configuraciones, formas geométricas y aplicaciones de estos dispositivos han sido descritas en publicaciones técnicocientíficas y patentes; se destacan específicamente los trabajos sobre válvulas neumáticas de Geldart y Jones (1991), Levenspiel y Kunii (1997), Hua *y col.* (2002), Daous y Al-Zahrani (1998), Huang *y col.* (1995), Chin y Knowlton (1993) y Matsumoto *y col.* (1977). Por lo que respecta a patentes, se destacan siete patentes sobre diferentes tipos de válvulas neumáticas utilizadas como elemento regulador del flujo de sólidos granulares en cargas, descargas y control de nivel de sistemas fluidizados (MX168813, US 5205998, US 4705433, US 4687382, US 4500231, JP6074418A, JP8134520A).

La válvula-S se diseñó y utilizó por primera vez en la operación de un sistema experimental de lechos fuente en multietapa (Arriola, 1997); se trata de una modificación ingeniosa de la válvula-L (Geldart y Jones, 1991; Knwolton y Hirsan, 1978), que utiliza pulsos de aire para su funcionamiento y un sello de sólidos que se forma después de cada pulso. Esta válvula pertenece al grupo de las denominadas, válvulas no-mecánicas, que controlan el flujo de materiales granulares con sólo la inyección de un gas. En este grupo se incluyen las válvulas-L, las válvulas-J (Aragon, 2002), las válvulas-W (Levenspiel, 1997; Kunii y Levenspiel, 1991), las válvulas-V (Leung y Chong, 1987) y las válvulas-N (Hirama *y col.*, 1986).

Los sólidos llamados *granulares* son partículas cuyo tamaño oscila de micrómetros a centímetros. Estas partículas interactúan sólo mediante fuerzas

denominadas de rango corto, por ejemplo, las de contacto mecánico. Las fuerzas de rango largo, como las electrostáticas, no se consideran en estos sistemas, por lo que la dinámica de un material granular se rige por la ecuación del movimiento de Newton (Thorsten y Thomas, 2005). De acuerdo con lo anterior, en el modelo que aquí se presenta, no se toma en cuenta el cambio de densidad en el aire causado por la caída de presión o de temperatura en el sistema (la densidad de las partículas son del orden de los 1200 kg/m^3 , en contraste con la densidad del aire a temperatura ambiente que es 0.0013 kg/m^3).

La operación de una válvula “no mecánica” es dependiente -fundamentalmente- de la caída de presión en el sistema y de la geometría de la válvula (Geldart y Jones, 1991; Knwolton y Hirsan, 1978); asimismo, debido el bajo contenido de humedad de las partículas (alrededor del 8%), en el presente trabajo no se consideran sus efectos.

En procesos como el secado y/o tostado de café, secado de semillas de limón, de granos de maíz, la gasificación de carbón, etc., el uso de las válvulas-S sería muy conveniente y ampliamente recomendado. La válvula-S está diseñada para manejar partículas sólidas de gran tamaño ($> 10^{-3} \text{ m}$), que normalmente resultan difíciles de fluidizar, y que se conocen como sólidos tipo “D” de la clasificación de Geldart (Levenspiel y Kunni, 1997).

El *análisis dimensional* es una herramienta de trabajo muy útil cuando el número de variables que intervienen en un fenómeno determinado es muy grande, requiriéndose entonces un trabajo de experimentación muy amplio, y en ocasiones costoso. Al combinar las variables en un número mucho más pequeño de parámetros adimensionales, se reduce el trabajo experimental de manera significativa. Asimismo, se puede utilizar el análisis dimensional cuando no existe una ecuación diferencial, obtenida a partir de principios fundamentales, que rija el proceso y que lo describa con claridad (Welty *y col.*, 1999).

El objetivo de este trabajo es la obtención de un modelo matemático para predecir la descarga de sólidos granulares a través de la válvula-S, a partir de números adimensionales generados mediante el análisis conocido como “Teorema de Buckingham” (o “Método Pi”). Siguiendo este método, se encontraron los números adimensionales que relacionan las variables involucradas; estas variables son: el

diámetro de los sólidos, la densidad de la partícula, el diámetro horizontal de la válvula, la presión de operación y la velocidad superficial del aire.

2 Materiales y métodos

2.1 Sólidos empleados

Se realizó un programa de experimentos con tres tipos de granos de diversos tamaños y geometrías: arroz, café y lenteja. El diseño de experimentos utilizado fue un multifactorial con diferentes niveles de medición, dejando a la variable “descarga” como variable dependiente y utilizando el flujo de aire, la presión de trabajo, el diámetro de las válvulas y el diámetro de las partículas como variables *predictoras* (Tabla 1). Los experimentos se realizaron por triplicado. El tipo de granos estudiado corresponde al tipo D, según la clasificación de Geldart, (Geldart, 1991). Los datos fueron analizados con el software Statgraphics Plus, versión 4.

Tabla 1. Variables del diseño del experimento

Variable	Niveles de medición	Unidades
Caudal (Flujo de aire)	0.07, 0.08 y 0.1	m^3
Presión	7×10^5 y 8×10^5	Pa
Diámetro de válvulas	0.04, 0.02	m
Diámetro de partícula (d_p)	0.0028, 0.00378 y 0.00646	m

Las propiedades relevantes de los sólidos utilizados para diseñar la válvula-S fueron las siguientes: diámetro geométrico de la partícula, d_p ; su densidad, ρ_p ; la esfericidad, ϕ_s ; y la fracción vacía, ε , considerando transporte neumático (Tabla 2). Las longitudes de los granos utilizados se midieron con ayuda de un micrómetro; la densidad se determinó mediante el método sugerido por Shoemaker y col. (1989) y por Baryeh y Mangope (2002); la esfericidad

se midió por el método sugerido por Baryeh y Mangope (2002); finalmente, para estimar la fracción vacía del lecho se recurrió a la definición presentada por Klinzing (1981).

2.2 Equipo y procedimiento

El sistema en donde se realizaron las pruebas, está constituido por un alimentador de sólidos construido en acero inoxidable, con base cónica y salida hacia un tubo de acrílico transparente de 0.04 m de diámetro, D_r , que está conectado directamente a la válvula-S construida con tubo de acrílico transparente de 0.04 m de diámetro (ver figs. 1 y 2). La válvula-S trabaja con aire comprimido como fluido pulsante; las pulsaciones fueron reguladas mediante el uso de una válvula solenoide.

El sistema completo lo integran también, el suministro de aire comprimido, un filtro de humedad de donde se derivan dos líneas: la primera conectada a un regulador de presión, seguido de una válvula solenoide de dos vías ON/OFF, que a su vez está conectada a un temporizador (con una exactitud del ajuste de un $\pm 5\%$), un rotámetro de escala de 0 a 0.15 m^3 y, finalmente, una boquilla conectada a la válvula-S; la segunda línea, que también tiene su regulador de presión y rotámetro, suministra aire al tanque alimentador de sólidos para tener la opción de trabajar el sistema a una presión mayor a la atmosférica.

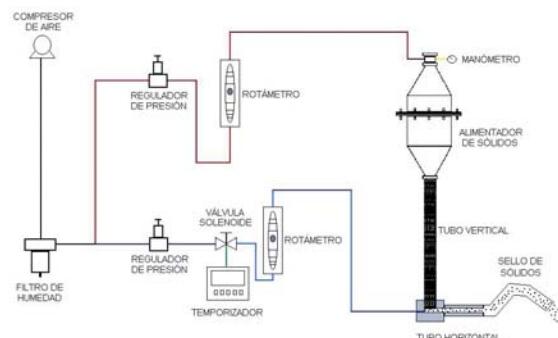


Fig. 1: Esquema del equipo utilizado

Tabla 2. Dimensiones características de los sólidos utilizados.

Partícula	Longitud característica d_p (m)	Esfericidad ϕ_s	Densidad (kg/m^3) ρ_p	Fracción vacía ε
Arroz	0.00280	0.76	1299	0.35
Lenteja	0.00378	0.83	1283	0.33
Café	0.00646	0.78	1192	0.43

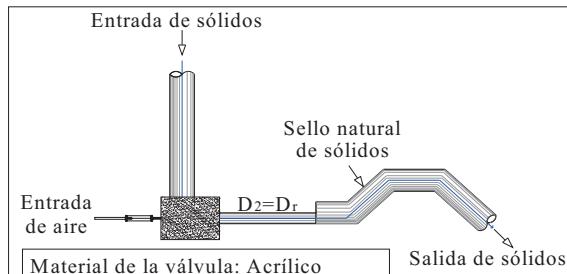


Fig. 2: Esquema de una válvula S

Los sólidos requieren de la eliminación de varas y/o sólidos grandes (basuras) que pudieran atorarse en el sistema y que crearían una resistencia extra que podría impedir que los sólidos fluyeran libremente; asimismo, se debe revisar y limpiar los filtros de aire y la trampa de agua. El flujo preciso de sólidos se obtiene mediante el uso de un cronómetro y una balanza. Todos los experimentos se realizaron a la temperatura ambiente y por triplicado.

2.3 Modelo matemático utilizando el análisis dimensional

Utilizando el Método de Buckingham, se determinó el conjunto de números adimensionales formados con las variables involucradas en la descarga de sólidos granulares a través de una válvula-S. En la Tabla 3 se muestra el listado de las variables significativas implicadas en el trabajo, se presentan junto con sus respectivas dimensiones.

Ya que en este caso el rango de la matriz dimensional es 3, el número de grupos adimensionales será: $\pi = 6 - 3 = 3$.

Continuando con el Método de Buckingham, debe de escogerse un núcleo de variables integrado por todas aquellas variables que contienen a todas las dimensiones fundamentales. Una forma de seleccionar este núcleo, es excluir del mismo a todas aquellas variables cuyo efecto se desea aislar. Para el presente problema se tiene que:

$$\pi_1 = u_0 P D_r \rho_p \quad (1)$$

$$\pi_2 = u_0 P D_r d_p \quad (2)$$

$$\pi_3 = u_0 P D_r G_s \quad (3)$$

Para π_1 :

$$\pi_1 = (u_o)^a (P)^b (D_r)^c (\rho_p) \quad (4)$$

Tabla 3. Variables significativas

No	Variable	Símbolo	Dimensiones
1	Velocidad superficial del aire	$u_g \varepsilon$	$M^0 L \theta^{-1}$
2	Diámetro relativo de la válvula	D_r	$M^0 L \theta^0$
3	Presión	P	$ML^{-1} \theta^{-2}$
4	Longitud característica de la partícula	d_p	$M^0 L \theta^0$
5	Densidad de la partícula	ρ_p	$ML^{-3} \theta^0$
6	Descarga de sólidos	G_s	$ML^0 \theta^{-1}$

O bien,

$$M^0 L^0 \theta^0 = 1 = \left(\frac{L}{\theta} \right)^a \left(\frac{M}{L \theta^2} \right)^b (L)^c \left(\frac{M}{L^3} \right) \quad (5)$$

Igualando los exponentes de masa (M), longitud (L) y tiempo (θ) en ambos lados de la expresión de la Ec. (5) y resolviendo algebraicamente, se tiene que $a = 2$, $b = -1$ y $c = 0$. Tomando en cuenta la relación entre la velocidad superficial del gas y la velocidad del gas entre las partículas es $u_o = u_g \varepsilon$, se tiene:

$$\pi_1 = \frac{(u_g \varepsilon)^2 \rho_p}{P} \quad (6)$$

Para π_2 y π_3 se aplica el mismo procedimiento para obtener:

$$\pi_2 = \frac{d_p}{D_r} \quad (7)$$

Los valores de π_3 , se obtienen combinando las ecs. (3) y (4)

$$\pi_3 = \frac{(u_g \varepsilon) G_s}{P D_r^2} \quad (8)$$

La función que relaciona a los números adimensionales obtenidos fue determinada mediante el método de regresión con datos obtenidos experimentalmente; para ello, se graficaron los valores de π_3 , como variable dependiente (puesto que contiene a la variable de interés G_s), y a π_1 y π_2 como variables independientes. Los datos fueron ajustados por una expresión logarítmica, obteniéndose un

$r^2 = 0.98$. El resultado de la tabla ANOVA demuestra un *p-value* menor a 0.05.

La expresión es del tipo $y = Ax + B$, en donde $y = \pi_3$, $x = \ln \pi_1$. Aplicando el método de Davis (Guatemala, 2007) para obtener una expresión que relacione los tres números adimensionales, se tiene:

$$\pi_3 = [(0.0037\pi_2 + 5 \times 10^{-5}) \ln \pi_1] + 0.019\pi_2 + 0.0006 \quad (9)$$

O bien,

$$Gs = \left[\left(0.0037 \left(\frac{d_p}{D_r} \right) + 5 \times 10^{-5} \right) \ln \left(\frac{(u_g \varepsilon)^2 \rho_p}{P} \right) + 0.019 \left(\frac{d_p}{D_r} \right) + 0.0006 \right] \left(\frac{PD_r^2}{(u_g \varepsilon)} \right) \quad (10)$$

3 Resultados y discusión

Los datos obtenidos permiten visualizar el comportamiento de la válvula-S. El flujo de sólidos depende de los diámetros de la válvula y de las partículas, de la presión del aire inyectado, del flujo del aire que acarrea los sólidos (velocidad) y de la duración y frecuencia de las pulsaciones de la válvula solenoide (ON-OFF). Las gráficas de las figs. 3 y 4 que a continuación se muestran, son un ejemplo de lo que aquí se menciona.

En estas figuras se puede observar la variación de la descarga de sólidos en función de la velocidad del aire para dos diferentes tipos de granos utilizados, lenteja y arroz respectivamente. Las dimensiones del prototipo de válvula-S utilizado fueron de 0.5 m de longitud y 0.04 m de diámetro relativo. Las condiciones de operación para ambos

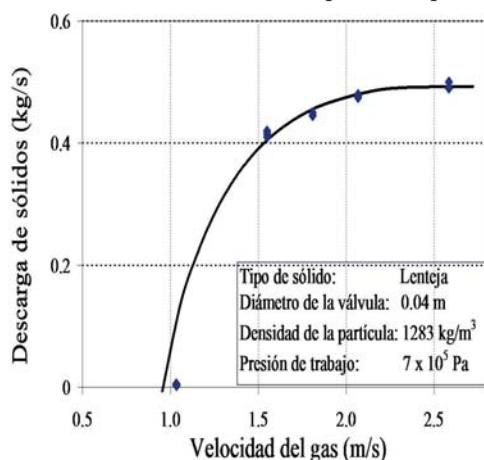


Fig. 3: Flujo de sólidos vs velocidad superficial del aire para la lenteja.

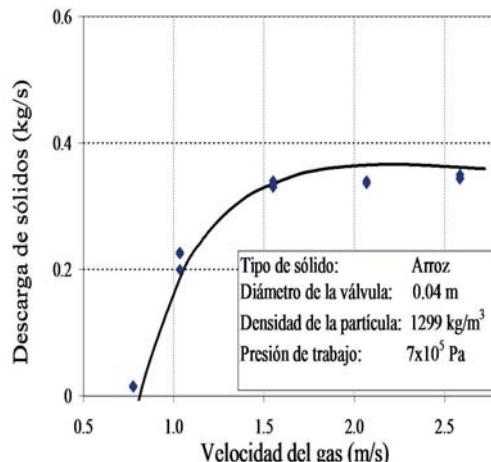


Fig. 4: Flujo de sólidos vs velocidad superficial del aire para el arroz.

casos fueron: una frecuencia en la válvula solenoide de 1 segundo ON y un segundo OFF y una presión de operación de 7×10^5 Pa. Asimismo, en esas mismas figuras se puede observar la línea correspondiente al modelo de números adimensionales que fue desarrollado en este trabajo.

En las figs. 5, 6 y 7, se puede apreciar la tendencia a la formación de una meseta que señala el límite de descarga de sólidos fijado por el diámetro de la válvula-S. Los valores máximos obtenidos fueron de: 0.45 kg/s; 0.46 kg/s y 0.510 kg/s para arroz, lenteja y café respectivamente, con una presión de operación (presión de trabajo) de 8×10^5 Pa y diámetro relativo de 0.04 m. Los intervalos de velocidad superficial del aire que se manejaron fueron de: 1.2 - 3.5 m/s para el café, entre 0.8 - 3 m/s para el arroz y entre 1 - 3 m/s para la lenteja.

Hay que destacar que los primeros intentos de caracterizar la válvula-S se hicieron desarrollando modelos empíricos, (Santoyo y col. 2008., Arriola, 2004) y representando gráficas experimentales en un limitado rango de aplicación (Guatemala, 2007).

Existen antecedentes de modelado de este tipo de dispositivos no-mecánicos para el control de flujo de sólidos, por ejemplo, el desarrollado por Hua y col. (2002), que presentan un modelo hidrodinámico para la válvula-L, y su validación realizada por Knowlton y Hirsan (1978) y Zheng y Wang (1993). Los autores de estos trabajos reportan variaciones importantes (no se mencio-

Tabla 4. Ajustes del modelo

Sólido	D_r (m)	P (Pa)	Gs máximo(kg/s)	Velocidad mínima de operación observada (m/s)	Referencia	% de error del pronóstico
Lenteja	0.04	7×10^5	0.490	0.90	Fig. 3	$\pm 2\%$
Arroz	0.04	7×10^5	0.360	0.77	Fig. 4	$\pm 3\%$
Arroz	0.04	8×10^5	0.450	0.66	Fig. 5	$\pm 2\%$
Lenteja	0.04	8×10^5	0.460	0.88	Fig. 6	$\pm 5\%$
Café	0.04	8×10^5	0.510	1.10	Fig. 7	$\pm 15\%$
Mostaza	0.04	7×10^5	0.470	0.71	Fig. 8	$\pm 5\%$
Arroz	0.02	7×10^5	0.130	3.00	Fig. 9	$\pm 10\%$
Lenteja	0.02	7×10^5	0.140	2.90	Fig. 10	$\pm 10\%$

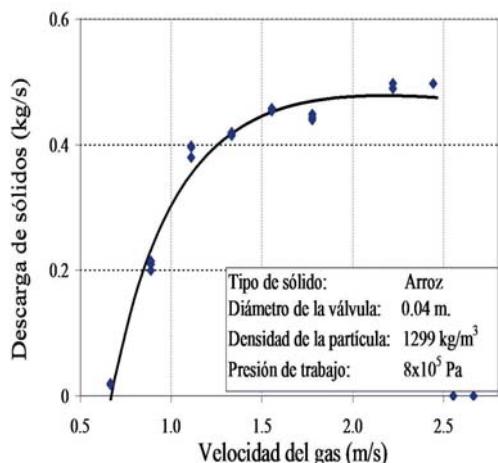


Fig. 5: Flujo de Sólidos vs Velocidad superficial del aire para el arroz (presión de trabajo 8×10^5 Pa).

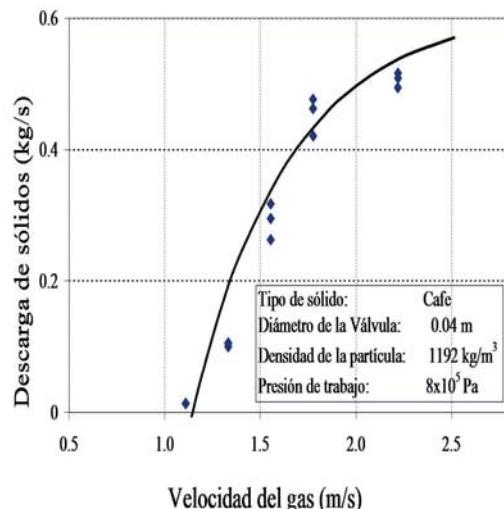


Fig. 7: Flujo de sólidos vs velocidad superficial del aire para el café (presión de trabajo 8×10^5 Pa).

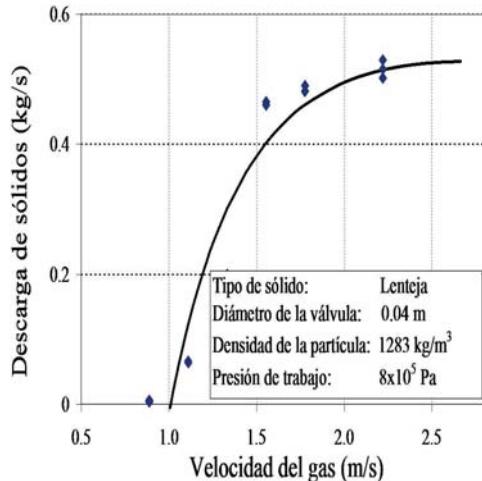


Fig. 6: Flujo de sólidos vs velocidad superficial del aire para el lenteja (presión de trabajo 8×10^5 Pa).

nan los índices de variación) entre los datos pronosticados y los datos observados. Jones y Davidson (1965), obtuvieron una ecuación empírica para predecir la caída de presión en una válvula-L; dicha información fue utilizada por Wen (2003), para predecir la descarga de sólidos a través de dicha válvula, reportando una desviación del 30% en promedio. Ya que la válvula-S es un diseño novedoso, con características geométricas y de operación especiales, se tiene la necesidad de adquirir información básica importante para conocer y operar el sistema. Esta operación es, por mucho, compleja, sobre la que no hay previa información a la reportada en los trabajos señalados al principio de este párrafo.

La Tabla 4, muestra las predicciones del modelo obtenido. En las figs. 3-8 se observa el ajuste de la línea del modelo; es posible

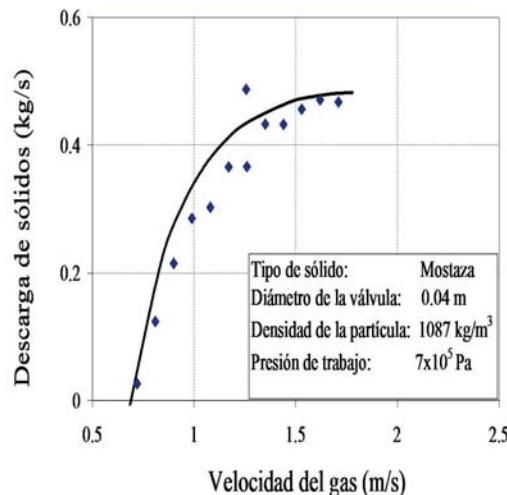


Fig. 8: Flujo de sólidos vs velocidad superficial del aire: datos tomados por Martínez, (2006).

afirmar que este modelo predice razonablemente el comportamiento del sistema para los sólidos granulares utilizados (85% para café, 97 % para lenteja y 98% para arroz). Asimismo, con el propósito de validar el alcance estimativo del modelo desarrollado en este trabajo, se utilizaron datos experimentales obtenidos por Martínez (2006), que usó mostaza en una válvula de diámetro de 0.04 m, con una presión de trabajo de 7×10^5 Pa. Los resultados muestran un ajuste favorable ± 5 % entre lo observado y lo pronosticado (Fig. 8).

En el caso del grano de café, se puede observar alrededor de un 15 % de error entre los valores medidos y los valores pronosticados; probablemente esta diferencia se debe a que el café, teniendo mayor diámetro de partícula, presenta una mayor inestabilidad en el flujo (que también se puede observar experimentalmente) y, por ende, un menor ajuste del modelo.

Los resultados experimentales para una válvula-S de 0.02 m de diámetro relativo, se muestran en las figs. 9 y 10. Las condiciones de operación para este caso fueron: una frecuencia en la válvula solenoide de 1 segundo ON y un segundo OFF y una presión de operación de 7×10^5 Pa. Se puede observar el límite máximo de operación de la válvula cuando se alcanza un flujo de sólidos de 0.14 kg/s para el grano de lenteja y 0.13 kg/s para el grano de arroz (el grano de café no fluye por ésta válvula). Asimismo, se puede observar que el flujo mínimamente estable se encuentra en

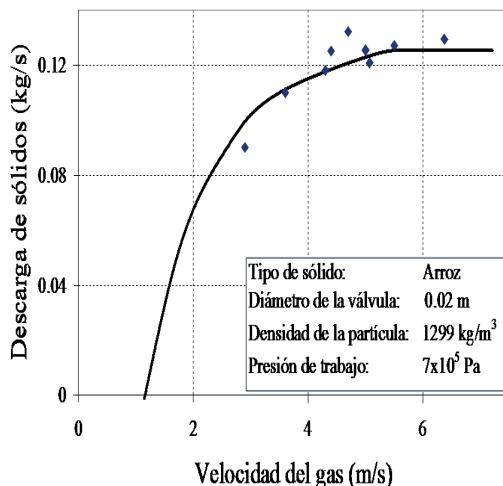


Fig. 9: Flujo de sólidos vs velocidad superficial del aire para el arroz.

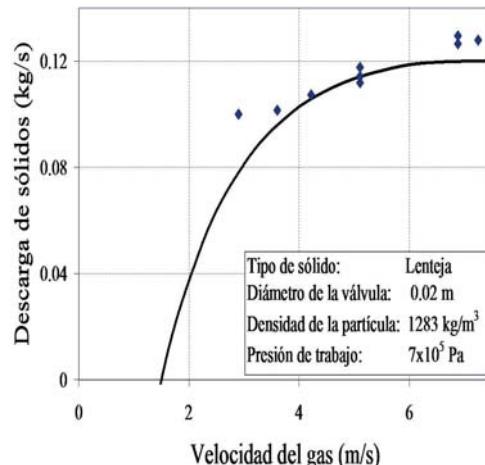


Fig. 10: Flujo de sólidos vs velocidad superficial del aire para la lenteja.

0.09 kg/s para arroz y lenteja. Las velocidades superficiales del aire se encuentran entre 2 y 6 m/s para ambos tipos de granos. Al disminuir el diámetro de la válvula las velocidades superficiales se incrementan, no obstante el flujo de sólidos disminuye. Los ajustes entre lo observado y lo pronosticado son del orden de ± 10 % para ambos granos.

Según Ortega (2000), las propiedades superficiales de las partículas, sus formas y granulometrías, así como las características geométricas de los equipos, son factores que afectan el flujo de los sólidos granulares. Para el caso del flujo con partículas pequeñas (arroz y lenteja), se puede observar que en la parte

superior del conducto recto de la válvula se forman canalizaciones por lo que coexisten una fase fluida y una fase sólida. Los granos de café, por otra parte, no presentan dichas características y no existe una diferencia de espacios vacíos entre la parte superior y la parte inferior del tubo. Asimismo, en el caso del grano de café, que es una partícula más grande (0.00646 m), se requiere una mayor fuerza para transportar el grano. La rugosidad de las partículas tiene una importancia menor y los datos experimentales han indicado que su efecto se puede despreciar (Castro, 1989).

Conclusiones

Se desarrolló un modelo matemático simple para predecir el comportamiento de la válvula-S, o válvula que escupe; para el presente trabajo se usó un prototipo construido con tubo de acrílico de 0.02 y 0.04 m de diámetro. Los experimentos se llevaron a cabo a temperatura ambiente y con dos presiones de operación de 7 y 8×10^5 Pa. Se utilizaron tres diferentes partículas: arroz, lenteja y café, con diámetros geométricos de: 0.0028, 0.00378 y 0.00640 m respectivamente. Mediante el análisis dimensional que se llevó a cabo, se encontraron tres números adimensionales:

$$\pi_1 = \frac{(u_g \varepsilon)^2 \rho_p}{P}, \quad \pi_2 = \frac{d_p}{D_r} \quad y \quad \pi_3 = \frac{(u_g \varepsilon) Gs}{PD_r^2}$$

Se generó un modelo en función de estos números adimensionales para la predicción del flujo de partículas sólidas en el transporte neumático de granos; este modelo permite predecir razonablemente el funcionamiento de la válvula-S para diversas situaciones.

El significado de cada número adimensional podría interpretarse de la siguiente manera:

π_1 , que es el recíproco del número de Euler, muestra la relación entre la energía cinética del flujo y la presión; es decir, la influencia directa que tiene la presión de operación en la descarga de los sólidos a la salida.

π_2 , expresa la importancia de la relación que existe entre el tamaño de la partícula y el diámetro del conducto de la válvula. El análisis hecho sobre las características del tipo de partícula, indican la importancia de relacionar el tamaño y densidad de la partícula con los diámetros de los conductos por donde fluyen los sólidos. Estos conductos deben de ser los suficientemente amplios para evitar

atoramientos e inestabilidad en el flujo a través de la válvula.

Por último, el número adimensional π_3 , indica que la descarga de los sólidos se verá altamente influenciada por la presión de operación de la válvula y por el área del ducto por donde fluyen. Este número adimensional no existe en la literatura especializada y es parte importante de la aportación de este trabajo.

La correlación obtenida, permite predecir el funcionamiento de la válvula-S para diversas situaciones de flujo para sólidos Geldart-D. Se obtuvieron pronósticos para diferentes condiciones, obteniéndose una desviación para la lenteja y el arroz de $\pm 3\%$ entre lo pronosticado y lo observado, y de $\pm 15\%$ entre lo observado y lo pronosticado para el café. Esto permite demostrar la diversidad de operación de la válvula-S.

En este proyecto se usaron dos prototipos de la válvula-S y se trabajó con una tecnología de nueva creación. Actualmente, en el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C. (CIATEJ), existe una válvula-S operando en un equipo piloto para secado y tostado de granos de café.

Nomenclatura

d_p	diámetro de la partícula, (m)
D_r	diámetro relativo de la válvula, (m)
ρ_p	densidad de la partícula, (kg/m^3)
Gs	gasto de sólidos, (kg/s)
P	presión, (Pa)
ϕ_s	esfericidad, (adimensional)
ε	fracción vacía, (adimensional)
$u_g \varepsilon$	velocidad superficial del aire, (m/s)
u_o	velocidad del aire (m/s)

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Jalisco, a la Universidad de Guadalajara, al Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C., proyecto COECYTJAL-UDG-PS-2009-564, México.

Referencias

Arriola, G. E. (1997). Residence Time Distribution of Solids in Staged Spouted

- Beds. Ph.D. Thesis. *Oregon State University.*
- Arriola, G. E., Martínez, O. E., Guatemala, M. G. M., García, H. T. y García, F. (2004). La "Válvula-S" Una Modificación Ingeniosa de la Válvula-L. Presentación en congreso, Mayo 4-7, Puerto Vallarta, Jalisco México. *XXV Encuentro Nacional de AMIDIQ.*
- Aragón, J. M. (2002). "La Válvula J". Universidad Computlense de Madrid. Disponible en http://www.ucm.es/info/otri/complutecno/fichas/tec_jmaragon2.htm Accesado: 10 de enero del 2010.
- Buckingham, E. (1914). On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Physics Review* 4, 345-376.
- Castro, E. S. (1989). *Consideraciones para el Diseño en Ingeniería en Alimentos: I Aplicación al Diseño de un Congelador de Lecho Fluidizado.* Biblioteca digital de la universidad de Chile. Edición Digital. Disponible en: http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/castroe08/01.html. Accesado: 10 de julio del 2009.
- Chin-Yung W. y Knowlton T.M. (1993). L Valve equations. *Powder technology* 77, 49 - 54
- Daous M. A. y Al-Zahrani A. A. (1998). Modeling solids and gas flow through an L-valve. *Powder technology* 9, 86-89.
- Geldart, D. y Jones, P. (1991). The behavior of L-valves with granular powders. *Powder technology* 67, 163-174.
- Guatemala, G. M. (2007). Tostado de café (*Coffea arabica*) utilizando un sistema de lechos fuente en multietapa. Tesis de Doctorado, *Universidad de Guadalajara.*
- Hirama, T., Takeuchi, H. y Horio, M. (1986). Nitric oxide emission from circulating fluidized bed coal combustion. *Proceedings of the 9th International Fluidized Bed Combustion Conference*, Boston, 898-910.
- Hua, T., Hongzhong, L., Xuesong, L. y Qiayu, Z. (2002). Hydrodynamic modeling of the L-Valve. *Powder technology* 129, 8-14.
- Huang, W., Xu, G., Li, H. y Kang, A. (1995). Mathematical model for the L-valve and its application in matter transfer control. *Journal of Huazhong University of Science and Technology* 23(4), 100-1004.
- Jones M. y Davidson J. F. (1965). The flow of particles from a fluidised bed through an orifice. *Rheological Acta* 4(3), 180-192.
- Klinzing, E. G. (1981). Gas-solid pneumatic transfer. En *Gas solid transport*. Chapter 23, P. 82. Mc. Graw Hill. Chemical Engineering series.
- Kunii, D. y Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering.* Butterworth Heinemann, second edition, USA.
- Knowlton, T. M. y Hirsan, I. (1978). L-valves characterized for solids flow. *Hydrocarbon process* 3, 149-156.
- Levenspiel, O. y Kunii, D. (1997). Circulating fluidized-bed reactor. *Chemical Engineering Science* 52(15), 2471-2482.
- Levenspiel, O. (1997). *Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor.* Editorial Reverte. España.
- Leung, L. S. y Chong, O. (1987). Operation of V-valves for gas-solid flow. *Powder Technology* 49, 271 - 276 271
- Baryeh, E. A. y Mangope, B. K. (2002). Some physical properties of QP-38 variety pigeon pea. *Journal of Food Engineering* 56, 59-65.
- Matsumoto, Kikuta, M. y Maeda, S. (1977). Effect of particle size on the minimum transport velocity for horizontal pneumatic conveying of solids. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 10(4), 273-279.
- Martínez, O. E. (2006). Caracterización de una nueva válvula de control de flujo para sólidos, la válvula S. Tesis de maestría. *Universidad de Guadalajara.*
- Melo, F. (2009). "Material granular". Explora, revista digital de divulgación científica. Disponible en: http://www.explora.cl/exec/cyt/preg_cientif/ficha.e3?id=76 Accesado: 10 de junio del 2009

- Ortega, E. (2000). *Operaciones unitarias y manejo de sólido.* Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Material didáctico disponible en: <http://www.fcq.uach.com.mx> Accesado: 20 de Junio del 2009.
- Santoyo, F., Guatemala, G., Bon, J., Orozco, I., García, F. y Arriola, E. (2008) Modelo estadístico que describe el funcionamiento de una válvula de reciente creación para el control del flujo de sólidos granulares. *Revista Alimentaria* 8(395), 85.
- Shoemaker, D., Garland, J., Nibler, W. (1989). *Experiments in Physical Chemistry.* McGraw-Hill. USA.
- Thorsten, P. y Thomas, S. (2005). *Computational Granular Dynamics.* Springer. Germany.
- Welty, J., Wicks, Ch. y Wilson, R. (1989). *Fundamentos de Transferencia de Momentum, Calor y Masa.* Limusa. México.
- Wen C. Y. (2003). *Handbook of fluidization and fluid particle system.* Siemens Westinghouse Power Corporation, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A.
- Zheng Q. Z. Ma, Wang, A.B. (1993). Experimental study of the flow pattern and flow behavior of gas - solid two phase flow in L-valve. In: A.A. Avidan (Ed.), *Circ. Fluidized Bed Technology 4*, 246-252