REVISTA PERUANA DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA. Volumen 5, N.° 1, 2002. Págs. 16-22

SECADO DE GRANOS I: PÉRDIDA DE PRESIÓN EN LECHO SURTIDOR

Cesario Condorhuamán C.

Departamento Académico de Operaciones Unitarias, Facultad de Química e Ingeniería Química
Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Resumen: Se han obtenido las pérdidas de presión experimentales como resultado de hacer fluir aire a través de una columna de lechos surtidor cargado con granos de trigo. Se emplea una columna de acero inoxidable cuya sección transversal, de forma semicircular, tiene 152.4 mm de diámetro, termina en una base cono truncado cuyo orificio de entrada es otro semicírculo de 12.5 mm de diámetro y una altura de 1.30 metros. Los resultados se obtienen a condiciones estándares de presión y temperatura. Los flujos de aire varían entre 9.9 y 52.2 metros cúbicos por hora y se obtienen pérdidas de presión entre 6.4 y 14.1 KPa/m, respectivamente.

Palabras Claves: pérdidas de presión, lecho surtidor, lecho estático, secado de granos.

Abstracts: It has been obtained a experimental drop in pressure as a result of making flow air through a column of spouted bed loaded with wheat grains. A built column of stainless steel is used whose traverse section in a semicircular way has 152.4 mm of diameter, it finishes in a base truncated cone whose entrance hole is other l semi-circulate of 12.5 mm of diameter and it has a height of 1.30 meters. The results are obtained to standard conditions of pressure and temperature, The flows of air vary between 9.9 and 52.2 cubic meters per hour and losses of pressure are obtained between 6.4 and 14.1 KPa/m, respectively.

Keys Words: losses of pressure, spouting bed, fixed bed, drying grain cereals.

FUNDAMENTOS

La salida de fluidos a través de empaques incluye rangos de porosidades de cero a cien por ciento. Cero representa el sólido impenetrable y 100% representa un conducto vacío.

Poiseuille[1] llevó a cabo experimentos en tubos capilares y estableció las relaciones de flujo laminar a través de conductos. Reynolds mostró experimentalmente que existen dos tipos de flujos: laminar y turbulento. Derivó un grupo adimensional, conocido como el número de Reynolds[2], que define la condición del sistema y predice el tipo de flujo. También demostró que la resistencia al flujo es una función de este grupo adimensional.

Darcy[3] estableció el concepto de flujo laminar a través de un lecho poroso. Su ecuación es la equivalente a la relación de Poiseuille para conductos y puede ser establecida como sigue:

$$v = \frac{dV}{Adt} = K_1 \frac{\Delta P}{\mu L} \qquad (1)$$

Blake[4] presentó la siguiente correlación para flujo laminar:

$$\frac{\Delta P}{L} \frac{g_c \rho_f \delta^3}{G^2 a} = f\left(\frac{G}{\mu a}\right) = K\left(\frac{G}{\mu a}\right)^{-1.0} \qquad (2)$$

Para derivar esta ecuación Blake tomó la suposición de Dupuit[5]: el diámetro efectivo es proporcional al volumen vacío por unidad de área

superficial y la velocidad superficial del lecho es inversamente proporcional a la porosidad del mismo.

Carman introdujo el concepto de factor de forma. Su importancia en el entendimiento del fenómeno de flujo de fluidos a través de lechos porosos ha sido resaltado por diversos autores.

Para partículas esféricas, la superficie específica fue transformada a diámetro de partículas por medio de la siguiente relación:

$$a = \frac{6(1-\delta)}{D_p} \qquad (3)$$

Para partículas no esféricas:

$$\phi_s = \frac{6(1-\delta)}{aD_p} \qquad (4)$$

donde ϕs es definida como:

$$\phi = \frac{a_p}{a} \qquad (5)$$

Max Leva[6] derivó una ecuación en la cual el factor de forma está directamente relacionado al diámetro de las partículas empacadas:

$$\lambda = 0.205\frac{S}{Vp^{2/3}} \qquad (6)$$

El factor de forma ha sido presentado en la literatura de varias maneras. Pueden ser relacionadas como sigue:

$$\lambda = \frac{1}{\phi s} \qquad (7)$$

Kozeny[8] asumió que el lecho granular es equivalente a un grupo de canales paralelos similares tal que la superficie interior total y el volumen interior total son iguales a la superficie de la partícula y al volumen de los poros en el lecho mismo. Además asumió que los pasajes en el lecho tortuoso son más largos que la profundidad del lecho, y la velocidad del canal es mayor que si el canal vertical recto existiera. Propuso la siguiente correlación para flujo laminar:

$$\frac{\Delta P}{L}\frac{g_c \rho_f \delta^3}{G^2 a} = 5\left(\frac{G}{\mu a}\right)^{-1.0} \qquad (8)$$

o:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180G(1-\delta)^2\mu}{\phi_s^2 D_p^2 g_c \delta^3 \rho_f} \qquad (9)$$

Carman[9] demostró la validez de la correlación propuesta por Kozeny y derivó la siguiente expresión para flujo turbulento:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{G^2 a}{g_c \delta^3 \rho_f} 0.4\left(\frac{G}{\mu a}\right)^{-0.1} \qquad (10)$$

o:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2.9G^{1.9}\mu^{0.1}(1-\delta)^{1.1}}{D_p^{1.1} g_c \phi_s^{1.1} \delta^3 \rho_f} \qquad (11)$$

Max Leva[7] derivó una ecuación teórica general para la difusión de fluidos en lechos empacados, estableciendo la analogía de este último y el flujo de fluidos en tubos vacíos:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{K}{g_c}\left(\frac{D_p G}{\mu}\right)^n \frac{\mu^2}{\rho_f}\frac{\lambda^{3-n}}{D_p^3}\frac{(1-\delta)^{3-n}}{\delta^3} \qquad (12)$$

Un lecho en surtidor es una aplicación de la fluidización[10] y se aplica para poner en contacto un lecho de partículas gruesas con fluidos.

Mathur y Gishler[11] estudiaron los parámetros y variables que afectan al poner en contacto un lecho de granos gruesos con un fluido, y obtuvieron una ecuación para estimar la velocidad mínima del fluido necesario para producir el chorro o surtidor, como una función del diámetro de columna, del orificio, el espesor de lecho y algunas características del fluido y partículas sólidas.

El lecho surtidor tiene características especiales, el gas ingresa por la base de la columna a través de un orificio al lecho; durante su desplazamiento la corriente de gas forma un canal llamado surtidor que arrastra a las partículas ori-

ginando un movimiento de traslación de los granos a lo largo del lecho en la columna, favorecido éste por un tronco de cono en la base de la columna; se observa que existe una renovación continua de las partículas que entran en contacto con el fluido.

Madonna y Lama [12, 13, 14, 15] y Lama[16] obtuvieron una correlación para estimar la pérdida de presión del lecho surtidor para flujo de aire, usando como base la ecuación de Leva[5] cuya forma final es:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1120 G \mu \lambda^2 (1-\varepsilon)^2}{D_P^{\,2} \rho_f \varepsilon^3} \qquad (13)$$

Para el punto de "Spout" que es considerablemente menor obtuvo:

$$\frac{\Delta P}{L} = 74 (G)^{1.25} \left[\frac{\mu^{0.75}}{g_c \rho_f} \right] \left[\frac{\lambda}{D_p} \right]^{1.75} \frac{(1-\varepsilon)^{1.75}}{\varepsilon^3} \qquad (14)$$

donde ΔP es la pérdida de presión en el lecho de partículas, G es el flujo másico del aire por unidad de la sección transversal de la columna vacía, μ es la viscosidad del fluido, λ es el factor de forma de la partícula, D_p es el tamaño medio de los granos, p_f es la densidad del fluido, ε es la porosidad del lecho de partículas, L es el espesor del lecho y g_c es la constante de la ley newton. Zanker[17] y otros[18] proponen correlaciones para estimar las dimensiones críticas de una columna de lecho surtidor, tales como la altura mínima y diámetro.

El objetivo del presente trabajo es obtener una base de datos experimentales de la pérdida de presión que produce un lecho de granos de trigo en una columna de lecho surtidor, en función de una corriente de aire comprimido a 40 Psig.

EQUIPO

En el trabajo se ha implementado una unidad experimental de un lecho surtidor tal como se muestra en la figura 1 y que consiste de:

Una columna de acero inoxidable cuya sección transversal de forma semicircular tiene 152.4 mm de diámetro, termina en una base cono truncado cuyo orificio de entrada es otro semi-circulo de 12.5 mm de diámetro y tiene una altura de 1.30 metros; y con una ventana de material acrílico transparente a fin de permitir la observación del desplazamiento de los granos.

Un medidor de área variable(rotámetro) la que permite medir el flujo de aire entre 0,11 a 1,133 metros cúbicos por minuto calibrado a condiciones estándares de 101.4 Kpa y 294.4 K de presión y temperatura, respectivamente. Y de características: Calibrado para lectura directa del aire de altura: 127 mm. Exactitud: ± 3% de la escala; Repetibilidad: ±0.5%. Presión y temperatura máxima: 200 Psig y 93 °C. Un manómetro de vidrio pyrex en forma de U de 70 cm de altura. Tuberías de una y dos pulgadas de diámetro y accesorios de fierro galvanizado.

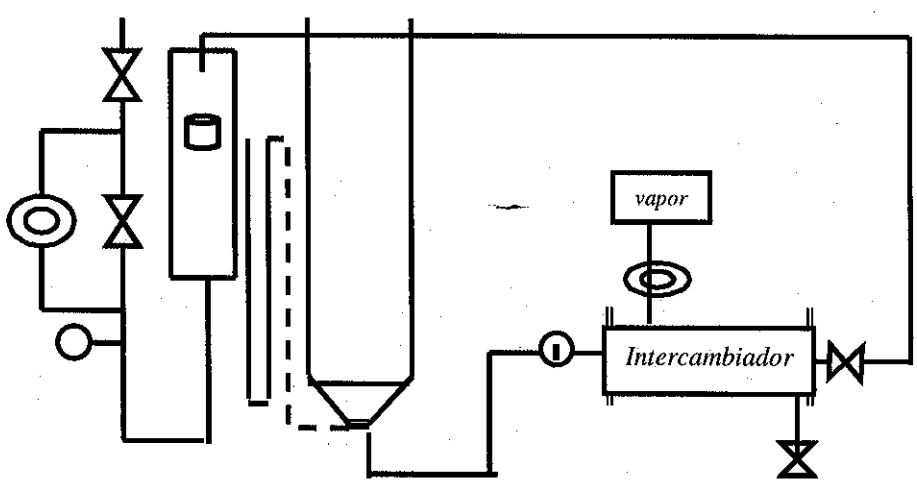

Figura N.° 1. Diagrama del equipo experimental de secado de granos de trigo

Una Válvula reguladora de presión. Un termómetro digital de 0 a 150 °C con una sensibilidad de ±0.1 °C.

MATERIALES

En el trabajo se emplea granos de trigo sin cáscara con un diámetro equivalente promedio de 3,35 mm.

METODOLOGÍA DEL TRABAJO

En la obtención de datos experimentales se ha seguido el siguiente procedimiento:

Los valores numéricos se obtienen a condiciones de 377.1 kPa de presión absoluta y temperatura ambiental.

El tamaño de los granos de los cereales se seleccionan por medio de tamizado.

La presión del aire en el sistema se regula por medio de una válvula reguladora de presión y el flujo del mismo por un rotámetro instalado a la entrada de la columna.

Las densidades absolutas y aparentes de los granos, tales como trigo, cebada y frijol se determinan usando un Picnómetro de 50 mililitros de capacidad.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La tabla 1 muestra las propiedades físicas de cebada, trigo, café, quinua y frijol. El diámetro de las partículas se obtiene aplicando el concepto de radio hidráulico. Las densidades se obtienen por el método de picnómetro.

Para determinar el factor de forma se ha medido las tres dimensiones de una muestra de 80 granos, se obtiene el promedio aritmético de cada uno, los valores promedios se multiplican entre sí y luego se extrae la raíz cúbica. El factor de forma se calcula considerando como una relación entre el resultado del último cálculo y la dimensión promedio más grande. El factor de forma obtenido fue comparado con los estimados de la literatura, lo cual muestra una gran coincidencia dentro del error experimental cuyos resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla N.° 1

PROPIEDADES FÍSICAS DE ALGUNOS GRANOS DE CEREALES

	Densidad (Kg/m^3)		Diámetro (mm)	Porosidad	Factor Forma	Tipo de Lecho
	Absoluta	Aparente				
Cebada	1230	790	3,90	0,3545	1,12	Denso
Trigo	1370	800	3,92	0,4175	1,14	Normal
Café	1120	630	15,4	0,4384	1,21	Normal
Quinua	1380	940	2,02	0,321	1,02	Denso
Frijol	1150	560	7,17	0,5143	1,35	Flojo

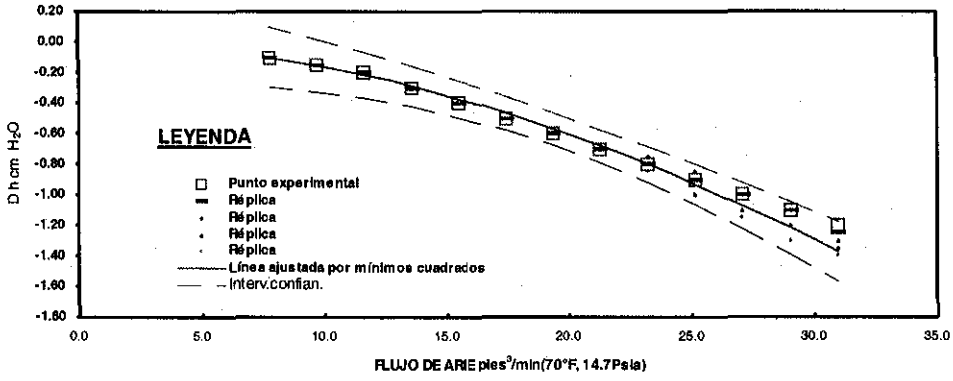

Figura N.° 2. Curva de calibración del rotámetro en función de la diferencia de alturas del manómetro en U de agua.

La pérdida de presión para flujo de aire en la columna vacía se presenta en la figura 2 y corresponde a una ecuación de tipo exponencial, los datos experimentales se toman por triplicado. Así mismo, haciendo uso del análisis estadístico se estima el intervalo de confianza del 95 %.

La pérdida de presión que ocasiona una altura inicial de 0,203 m de granos de trigo en una columna de lecho surtidor se muestra en la figura 3; los valores máximo y mínimo son 19,2 y 9,9 kilo Pascal por metro de espesor de lecho, respectivamente.

Los datos experimentales de la pérdida de presión de lecho en surtidor para granos de trigo se presentan en la tabla 2, los valores numéricos de los datos se obtienen por triplicado.

Se observa de la figura 3 que a medida que el flujo del aire aumenta en el lecho estático, la pérdida de presión se incrementa debido a la resistencia que opone el lecho hasta alcanzar un punto máximo; a partir de este, el lecho empieza a expandirse y la pérdida de presión disminuye. Un aumento en el flujo del aire ocasiona un descenso brusco de la caída de presión y los granos en el lecho salen disparados hacia la parte superior de la columna por el chorro de aire o "Spout".

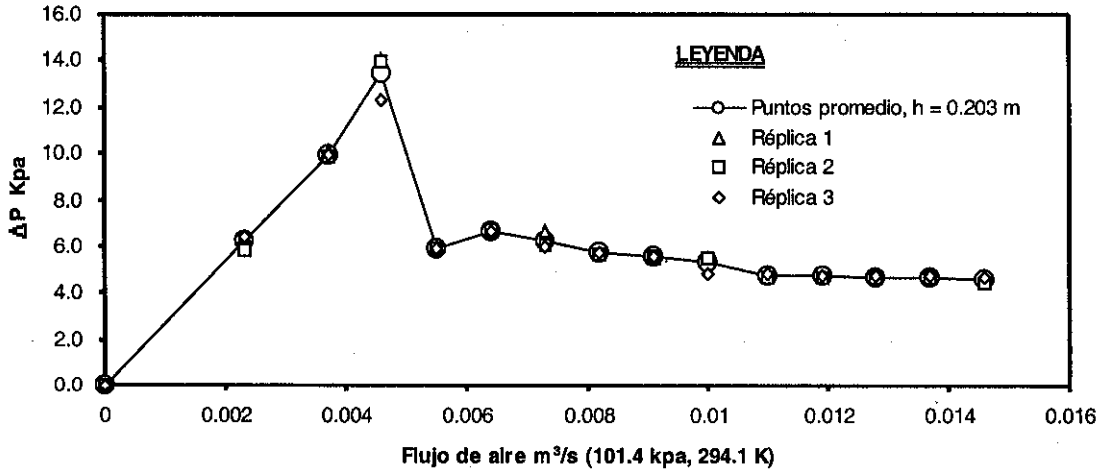

Figura N.° 3. ΔP en función de la corriente de aire en columna de lecho surtidor

La pérdida de presión de varias alturas iniciales de lecho de trigo en una columna de lecho surtidor se muestra en la figura 4.

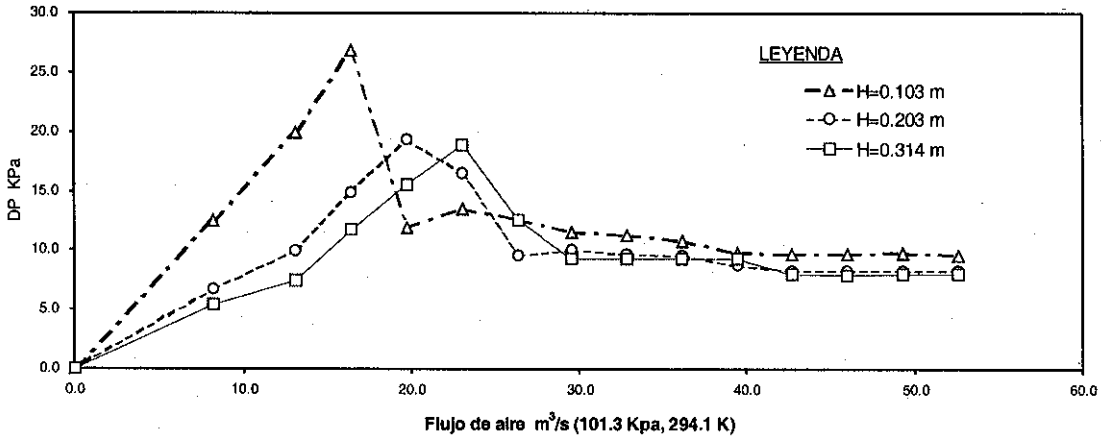

Figura N.° 4. Curva de la DP en función del flujo del aire en una columna de lecho surtidor

Tabla 2

Datos experimentales de pérdida de presión en lecho surtidor
Material sólido: Granos de trigo sin cáscara
Peso de granos en lecho: 1620 gramos
Altura del lecho : 0.203 m

Flujo aire 101.4 Kpa,294,1 k m^3/s	ΔProm KPa/m	ΔP_1 KPa/m	ΔP_2 KPa/m	ΔP_3 KPa/m
0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0023	6.2	6.4	5.8	6.4
0.0037	10.0	10.1	9.9	9.9
0.0046	13.4	14.1	14.0	12.3
0.0055	5.9	6.0	5.9	5.9
0.0064	6.7	6.6	6.8	6.7
0.0073	6.2	6.7	6.0	6.0
0.0082	5.7	5.7	5.7	5.7
0.0091	5.6	5.5	5.6	5.6
0.01	5.3	5.5	5.5	4.9
0.011	4.8	4.8	4.6	4.9
0.0119	4.7	4.7	4.7	4.8
0.0128	4.7	4.7	4.6	4.8
0.0137	4.7	4.7	4.6	4.8
0.0146	4.6	4.6	4.4	4.7

La pérdida de presión en el lecho estático es proporcional al flujo del aire, siendo la pendiente de la porción lineal 1,55 ±0,01,y esto indica que el flujo del aire se encuentra en régimen transitorio.

CONCLUSIONES

1. La pérdida de presión puede correlacionarse en función del flujo del aire para el lecho de granos antes de alcanzar el punto "spout" o canal de chorro.
2. El comportamiento de lecho surtidor presenta similitudes con la fluidización canalizada.

RECOMENDACIONES

1. El estudio de la porosidad en el lecho surtidor podría dar mayor claridad en el discernimiento de esta técnica.
2. El análisis y correlación de datos experimentales esta en proceso y se publicará posteriormente.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Poiseuille, J., Mémoires des Savants Etrangers, 9, 433 (1846).

[2] Reynolds,G., Trans. Roy. Soc. (London), **174**, 935(1846).

[3] Darcy, H., "Les Fontains Publiques de la Ville de Dijon", Victor Delmont, Paris (1856).

[4] Blake, F.C., Trans. Am. Inst. Chem. Enrs., **14**, 415 (1922).

[5] Dupuit, A. J. E. J., "Etudes Théorétiques et Pratiques sur le mouvement des Bax,", Paris(1863).

[6] Leva, M., Chem. Eng. Prog. **43**, 549(1947).

[7] Leva, M, Wientraub, M., Grummer, M., Polichick, M. and Storch, H., H., "Fluid Flow Through Packed and Fliudized Systems", Bureau of Mines, U.S.A., Bulletin **504**, (1951).

[8] Kozeny, Ber. Wien Akad., **136a**, 271 (1927)

[9] Carman, P.C., Trans. Inst. Chem. Eng. (London), **15**, Part 1, 150 (1937).

[10] Frantz, J.F., "Design for Fluidization part 1", Chem. Eng. Setiembre 17, de 1962.

[11] Mathur, K. B. and Gishler, P. E., "A technique for Contacting Gases with Coarse Solid Particles", A.I.Ch.E. Journal, **1(2)**, 157 (1955).

[12] Madonna, L. A., and R.F. Lama, "The Derivation of an Equation for Predicting Minimum Spouting Velocity", A.I.Ch.E. Journal, **4 (4)**, 497 (1958).

[13] Madonna, L. A., and Lama, R.F., "Pressure Drop in Spouted Beds", Ind. and Eng. Chem., **52(2)**, 169 (1960).

[14] Malek, M.A., L.A. Madonna and B.C. Lu, "Estimate of Spout Diameter in a Spouted Beds", Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., **2**, 30-34, 1963.

[15] Malek, M.A., L.A. Madonna and B.C. Lu, "Pressure Drop and Spouted Bed Heights in Spouted Beds", Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. , **4(1)**, 123-128, 1965.

[16] Lama, R.F., "Pressure Drop in Spouted Beds", Thesis of Master of Science in Chemical Engineering, **University of Ottawa**, Canada (1957).

[17] Zanker, A. "Designing spouted beds", Chem. Eng., **nov. 21**, 207, 1977.

[18] Olazar, M., Aguayo, J. y Bilbao, J., "Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contacting Regimes in Conical Spouted Beds", Ind. Eng. Chem. Res., **31(7)**, 1784 (1992).