

Diseño de un Secador Piloto de Lecho Fluidizado

Design of a Pilot Fluidized bed Dryer

Autores:

Tatiana Angulo

Wilson Ávila

Luis Bonilla

Universidad de Guayaquil,
Facultad de Ingeniería Química,
Av. Delta y Av. Kennedy,
Guayaquil-Ecuador
Teléfono: 0981387336, 0980313389
Correo Electrónico: tattys1410@gmail.com;
wilsonavila2311@gmail.com;
luisbonillaa@yahoo.com

RESUMEN

En este trabajo de investigación se diseña a nivel piloto un secador de lecho fluidizado, usando como medio fluidizante aire caliente, y como medio calefactor vapor de agua saturado. Este diseño se fundamenta en el fenómeno de fluidización, la cual permite establecer un mejor contacto entre el material húmedo a secar y el agente de secado, logrando altas tasas de transferencia de masa y calor. Para demostrar la efectividad del secador diseñado se utilizaron como materiales a secar: cacao, alverja y café, con el fin de poder estudiar los comportamientos de partículas de diferente tamaño; el diseño se elaboró considerando la partícula de mayor tamaño (cacao), dando un margen de seguridad del mismo. Se realizaron pruebas experimentales las cuales demostraron la efectividad del secador disminuyendo un 24% de humedad base húmeda del cacao, 43.2% de humedad base húmeda de la alverja y 27.5% de humedad base húmeda del café. En la investigación se determinó que las variables que hay que consideran para eficiente proceso son: temperatura del aire caliente, la presión de vapor las cuales deben mantenerse constantes, otras variables importantes que se consideran como: tamaño de la partícula, humedad inicial, flujo de aire.

Palabras Clave: lecho, fluidizado, fluidización, partícula.

ABSTRACT

In this research is designed to pilot scale fluidized bed dryer using hot air as fluidizing medium and as a means saturated steam heater. This design is based on the phenomenon of fluidization, which allows for better contact between the wet material to be dried and the drying agent, achieving high rates of heat and mass transfer. To demonstrate the effectiveness of the designed dryers were used as materials to dry cocoa, peas and coffee, in order to study the behavior of particles of different sizes; design was developed considering the larger particle (cocoa), giving a safety margin thereof. They were performed experimental tests in which it showed the dryer efectivity that decreased in a 24% of moisture from cocoa, 43.2% of moisture from peas and 27.5% of moisture from coffee. In the investigation it is determined that the variables to be considered for efficient process are: hot air temperature, the vapor pressure of which must be kept constant, other important variables that are considered as particle size, initial humidity, flow air.

Keywords: bed, fluidized, fluidization, particle.



Los productos y materias primas requieren de un porcentaje de humedad para poder conservar sus propiedades físicas y químicas. El secado es la operación unitaria que consiste en quitar o disminuir la humedad de cualquier sólido o semisólido que la posea. Existen diferentes equipos para llevar a cabo el proceso. Uno de los métodos empleados para ello es el secado de lecho fluidizado.

En la práctica se observa que cuando se seca un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos. Ellos son la transmisión de calor para evaporar el líquido, generalmente por convección y conducción, y la transferencia de masa en humedad interna y líquido evaporado. El secado mantiene una relación casi fija con otras operaciones de un proceso, así le sigue a menudo a una filtración o a una centrifugación y precede a un paso de molienda y empaquetamiento, por este motivo se considera al secado como una operación de acabado porque en la mayoría de los casos se realiza al final del proceso. El secador de lecho fluidizado proporciona menores tiempos de secado debido a la alta transferencia de calor y masa, en comparación con los otros tipos de secadores.

MÉTODOS

Transferencia de calor

La transferencia de calor en el proceso de secado se da para aumentar la temperatura del sólido mojado y evaporar el contenido de humedad. Ocurrirá a través del flujo de calor, como resultado de convección, conducción o radiación, y en ciertos casos como el resultado de la combinación de cualquiera de esos efectos.

Transferencia de masa

Dependerá de dos mecanismos; el movimiento interno de humedad en el sólido que es una función de la naturaleza física interna del sólido y de su contenido de humedad, y del movimiento de vapor de agua de la superficie del material como resultado de condiciones externas de temperatura, humedad de aire y fluido, área de exposición y presión flotante. El vapor de agua se difunde a través de la película para posteriormente llegar a la corriente de aire. Esto genera una región de baja presión de vapor de agua en la superficie del alimento y un gradiente de presión de vapor de agua entre el contenido de humedad del interior del alimento y el aire seco. Este gradiente provoca una fuerza impulsora para remover el agua del alimento (Rahman, 1999).

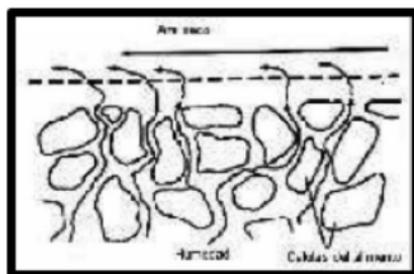


Fig. 1 Esquema del movimiento de la humedad durante el secado. Fuente: Hui, 1992

Fluidización

Un lecho consiste en una columna de partículas sólidas, a través de las cuales circula un fluido que puede ser líquido o gas. Se da el nombre de fluidización al proceso de contacto que ocurre entre un sólido y un fluido (gas o líquido), en el cual el lecho, formado por partículas sólidas finamente divididas, se levanta y agita por medio de una corriente ascendente de fluido. La velocidad del fluido debe ser lo suficientemente alta como para suspender las partículas, pero a la vez no tan elevada como para expulsar las partículas fuera del recipiente (McCabe, 1998).

CINÉTICA DEL SECADO

Si se grafica la velocidad de secado vs. el contenido medio de humedad se obtiene la curva de velocidad de secado. Esta se divide en cuatro períodos: período inestable de secado, periodo de velocidad de secado constante, primer período de velocidad de secado decreciente, segundo período de velocidad de secado decreciente. Estas curvas se forman en condiciones constantes de secado. Es decir, la velocidad, temperatura y presión del aire son constantes y las condiciones de salida del aire son sustancialmente las mismas que las de la entrada.

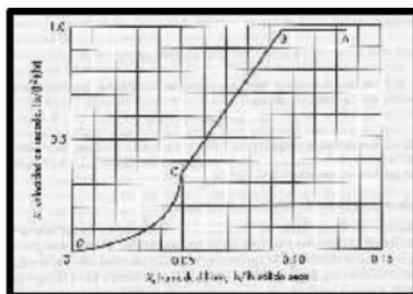


Fig. 2 Curva de velocidad de secado para un plato de cerámica porosa. Fuente: Banchemo, 1990

Velocidad de secado (W)

Se define la velocidad del secado, como la pérdida de la humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo. La velocidad de secado de un material

$$W = \frac{S - dx}{A * do}$$

(Banchero, 1990)

donde:

W = Velocidad de secado

S = peso de sólido seco

A = Área de secado (área de la superficie expuesta)

X = Contenido de humedad

Ø = Tiempo

COMPONENTES DE UN SISTEMA DE SECADO EN LECHO FLUIDIZADO.

Las partes más importantes de un secador de lecho fluidizado son las siguientes:

- El recipiente de fluidificación
- Cámara de secado
- Distribuidor de aire
- Sistema generador de aire caliente
- Ventilador o Blower
- Intercambiador de calor



Fig. 3 Diagrama de un secador de lecho fluidizado.
Elaborado por: Tatiana A, Wilson A, Luis A, 2015

Recipiente de fluidificación

Los secadores modernos en lecho fluidizado pueden adoptar muchas formas, pero básicamente consisten en una simple cámara, provista en su base de una rejilla para distribuir uniformemente los gases calientes a lo largo y ancho del lecho.

Cámara de secado

La forma más común es un cilindro vertical. Al igual que un recipiente diseñado para hervir un líquido, se debe suministrar espacio para la expansión vertical de los sólidos y para la separación del material salpicado y arrastrado. El volumen superior del lecho se conoce como espacio de separación. El área de la sección transversal se puede determinar mediante el flujo volumétrico de gas y la velocidad del gas permitida o requerida para efectuar la fluidización (Perry, 1984).

Margen Libre

Llamado margen libre o altura de separación, o liberación. Es la distancia comprendida entre la parte superior del lecho fluidizado y el ducto de salida del gas.

Distribuidores de aire

Para obtener una fluidización eficiente es esencial que el gas de secado se distribuya uniformemente en todo el lecho. La distribución será uniforme si la pérdida de carga en el distribuidor es suficientemente grande; en general debe ser por lo menos igual que la pérdida de carga a través del lecho. Algunos fabricantes de equipos utilizan como dis-

tribuidor platos perforados con orificios de aproximadamente 2 mm de diámetro y pueden estar dispuesto de manera que se imparta un movimiento circular al lecho fluidizado. (Nonhebel, 1979); Otros usan ranuras dispuesta circularmente y otros distribuidores del tipo de placa de burbujeo.

Los distribuidores (también llamados grillas) deben diseñarse para: Producir una fluidización estable en todo el lecho, Minimizar el escurrimiento de sólidos debajo de la grilla y Soportar el peso del lecho en el arranque de la unidad.

Sistema generador de aire caliente

Los componentes que intervienen en este proceso son: el ventilador y el calentador de aire, encargados de generar e impulsar aire caliente a la cámara de secado.

Ventilador

El ventilador, también conocido como soplador o blower por su traducción en la lengua inglesa, es una máquina que absorbe energía mecánica y la transfiere a un gas, proporcionándole un incremento de presión, consta de un motor y álabes que tienen como función principal desplazar un gas (normalmente aire) de un lugar a otro. Existen dos tipos de ventiladores: axiales y centrífugos. Al ser centrífugo el fluido cambia su dirección en un ángulo de 90° entre la entrada y la salida, el flujo de aire que produce es paralelo al radio de rotación, de esta forma proporciona presiones elevadas.

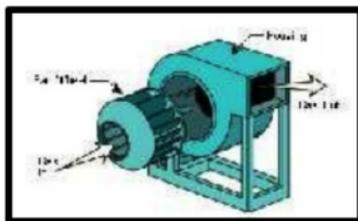


Fig. 4 Ventilador centrífugo

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Ventilador>



Calentador de aire

En el secador de lecho fluidizado el aire además de ser el medio fluidizante, también es el medio de secado, por tal motivo existe una gran importancia en el contacto entre la partícula húmeda y el aire de secado. Gracias a los estudios realizados por muchos autores, y a las prácticas realizadas en laboratorios, se ha corroborado que mientras mayor es la temperatura del aire menor es el tiempo de secado.

DISEÑO DEL SECADOR

Para realizar el diseño del secador, es necesario considerar los siguientes parámetros:

- Propiedades Físicoquímicas de las partículas a fluidizar
 - Propiedades del aire suministrado
 - Propiedades del lecho a fluidizar
- Se tomarán como variables de diseño el diámetro y la carga del equipo de secado:

Diámetro de las partículas a fluidizar (m)	
Cacao	0,017
Café	0,008
Alverja	0,007

$$D = 0.20 \text{ m} \quad M_s = 2 \text{ Kg}$$

Donde D es diámetro del equipo y Ms es masa del sólido a secar. A partir de los valores anteriores se harán los demás cálculos correspondientes al diseño.

Propiedades físicoquímicas de las partículas

Para el diseño del secador se escogieron como partículas a fluidizar:

- 1- cacao: grano grande,
- 2- café: grano mediano,
- 3- alverja: grano pequeño.

El diseño del secador será basado en la partícula con mayor diámetro para mayor seguridad del diseño. Las principales características físicas de las partículas a fluidizar son: forma, tamaño, volumen, área superficial, densidad y porosidad. Los valores obtenidos se muestran a continuación en la tabla 1.

PARÁMETRO A CALCULAR	ECUACIÓN	RESULTADO
Diámetro (d_p)	$d_p = \frac{l + a + e}{3}$	0,017 m
Volumen (v_p)	$v_p = l \cdot a \cdot e$	$3,54 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Área (S_p)	$S_p = 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2 + \pi \cdot d_p \cdot l$	$1,94 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Densidad (ρ_r)	$\rho_r = \frac{m}{v_p}$	990 kg/m ³
Estericidad (θ)	$\theta = \frac{S_c}{S_p}$	0,5774

Tabla 1. Propiedades físicoquímicas de la partícula Elaborado por: Tatiana A, Wilson A, Luis A, 2015

Propiedades del aire suministrado

Como se había indicado anteriormente, el aire es un factor muy importante en la fluidización, motivo por el cual se debe tomar el mismo flujo de aire que se necesita para fluidizar las partículas.

Dado que el aire es considerado como gas ideal se utilizó la fórmula de los gases ideales para calcular la densidad del mismo. Además de esto, para los cálculos pertinentes Todas las propiedades físicas del aire se leen a temperatura media de transferencia (Yunus A. Cengel, 2011):

VALORES ASUMIDOS		PARÁMETRO A CALCULAR	ECUACIÓN	RESULTADO
Temperatura de entrada del aire al IDC	30°C	Densidad	$\rho_p = \frac{P \cdot M}{R \cdot T a_i}$	1,00186 kg/m ³
Temperatura de salida del aire del IDC	80°C	Temperatura promedio del aire	$T_p = \frac{T a_i + T a_f}{2}$	55°C
Número de moles del aire	1	Temperatura media de transferencia	$T_m = \frac{T_p + T_v}{2}$	80°C
Presión atmosférica	1 atm			

Tabla 2. Propiedades del aire suministrado
Elaborado por: Tatiana A, Wilson A, Luis A, 2015

Propiedades de fluidización

De acuerdo a algunos autores, los cálculos referentes al diseño del secador de lecho fluidizado, deben realizarse bajo condiciones de mínima fluidización, para realizar los cálculos de fluidización se utilizó

como base la ecuación de la caída de presión de referencia, a continuación se detalla en la siguiente tabla las principales propiedades del lecho fluidizado.

PARÁMETRO A CALCULAR	ECUACIÓN	RESULTADO
Porosidad inicial del lecho	$\epsilon_0 = \frac{V_b}{V_t}$	0,343
Porosidad a mínima fluidización	$\epsilon_{mf} = \sqrt{\frac{1}{(0) + (14)}}$	0,408
Altura inicial del lecho	L_0	0,10 m
Altura del lecho en mínima fluidización	$L_{mf} = L_0 \frac{(1 - \epsilon_0)}{(1 - \epsilon_{mf})}$	0,131 m
Velocidad mínima de fluidización	$V_{mf} = 0,156 \cdot \left[\frac{(\rho_s - \rho_f) g (L_{mf})^3 d_p}{\rho_f} \right]^{1/2}$	6,82 m/s
Velocidad límite máxima	$V_{lim} = \frac{(2,32) (V_{mf})}{(\epsilon_{mf})^{3/2}}$	45 m/s

• ALTURA DE LA CÁMARA DE SECADO - MARGEN LIBRE.

• VELOCIDAD DEL AIRE QUE DEBE ENTREGAR EL VENTILADOR.

Tabla 3. Propiedades del lecho a fluidizar
Elaborado por: Tatiana A, Wilson A, Luis A, 2015

Además de esto, se calcula la potencia necesaria para que el ventilador pueda levantar el lecho de partículas y mantenerlas fluidizadas:



PARÁMETRO A CALCULAR	ECUACIÓN	RESULTADO
ΔP de mínima fluidización del lecho	$\Delta P_{mf} = L_{mf} (\rho_v - \rho_g) \cdot (1 - \epsilon_{mf}) \left(\frac{D}{B_f} \right)$	630.47 Pas
Caida de presión en el distribuidor	$\Delta P_d = \Delta P_{mf} \cdot 0.01 + 0.2 \left[1 - \exp \left(\frac{-D}{2h} \right) \right]$	126.04 Pas
Caida de presión por accesorios	$\Delta P_{ca} = K \cdot \frac{V_m^2}{2g}$	4.93 Pas
Caida de presión total del sistema	$\Delta P_{sis} = \Delta P_{mf} + \Delta P_d + \Delta P_{ca}$	824.21 Pas
Caudal volumétrico del fluido	$Q = V_m \cdot A_l$	0.857 m ³ /s
POTENCIA DEL VENTILADOR	$P = \Delta P_{sis} \cdot Q$	1.34 Hp

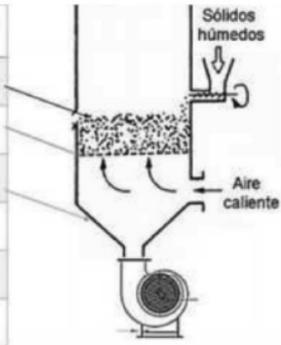


Tabla 4. Potencia del ventilador centrífugo
Elaborado por: Tatiana A, Wilson A, Luis A, 2015

Cálculos de diseño del intercambiador de calor

Previo a la revisión de ecuaciones se debe indicar la configuración escogida para el intercambiador propuesto en el diseño:

- Tipo: Banco de tubos con aletas externas
- Disposición de los tubos: Triangular
- Tipo de Flujo: Cruzado

Para realizar el cálculo del número de tubos primero se debe realizar un balance de energía en esta sección, considerando que para la respectiva transferencia se utilizará vapor saturado (dentro

de los tubos) como fluido caliente, y aire (fuera de los tubos) como fluido frío.

$$\begin{aligned} Q_{\text{vapor}} &= Q_{\text{aire}} \\ P &= q \end{aligned}$$

Q_p : es el calor que pierde el vapor al condensarse.
 Q_g : es el calor que gana el aire al calentarse

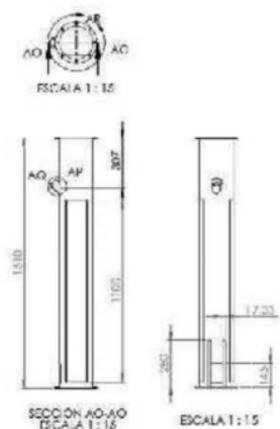
Todos los cálculos relacionados al Intercambiador de calor se realizaron en base al diseño propuesto por Cao, (2004). En la tabla 5 se detalla el resumen de los cálculos.

PARÁMETRO A CALCULAR	ECUACIÓN	RESULTADO
Número de filas "N _{fil} "	$Z = \frac{T_v - T_c}{T_v - T_{ca}} \quad \text{si } Z > 0 \quad N_{fil} \leq 4$	5
Longitud de los tubos	L	0,40 m
Ancho del IDC	$w_t = \frac{A_f}{L}$	0.3822 m
Número de tubos	$N_t = \frac{A}{g \cdot d_o \cdot L}$	64
Número de columnas "N _{tc} "	$N_{tc} = \frac{N_t}{N_{fil}}$	13

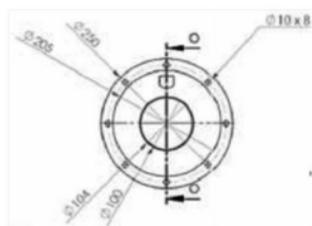
Tabla 5. Cálculos del Intercambiador de calor
Elaborado por: Tatiana A, Wilson A, Luis A, 2015

CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

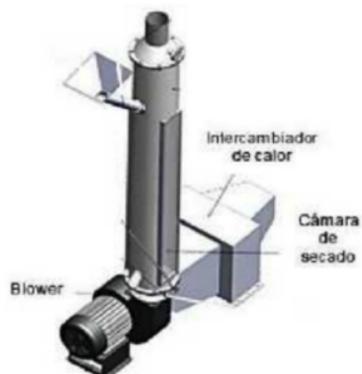
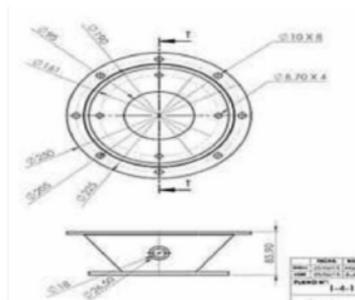
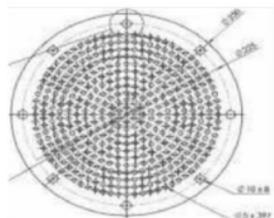
Una vez determinadas las condiciones de diseño, se procedió a la construcción del equipo de secado, basándose en los valores obtenidos teóricamente.



Plato Perforado



Ducto Distribuidor



PRUEBAS EXPERIMENTALES

Como se mencionó anteriormente se tomaron tres muestras de diferente diámetro para verificar el funcionamiento del equipo: cacao, café y alverja. En este apartado solo se presenta la prueba de realizada al cacao, ya que es la partícula base del diseño. Para determinar las variables del proceso de seca-

do, como presión, temperatura y velocidad de fluidización, se realizaron pruebas preliminares. Estas permitieron establecer los parámetros de secado con los cuales era más factible realizar las prácticas experimentales. A continuación se detalla en las siguientes tablas.

DAIOS DEL PROCESO DE SECADO DE CACAO

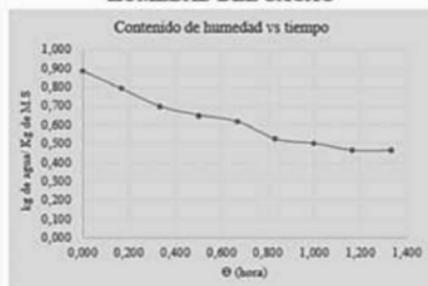
Tiempo	Temperatura	Temperatura	Presión	Peso de la muestra
	entrada del aire	salida del aire		
min	°C	°C	psi	kg
0	25	26	0	4
10	70	67	10	3,8
20	80	70	16	3,6
30	73	60	15	3,5
40	66	56	10	3,43
50	30	70	10	3,25
60	60	52	15	3,18
70	75	63	15	3,1
80	60	54	18	3,1

DATOS DEL PROCESO DE FLUIDIZACIÓN DE CACAO

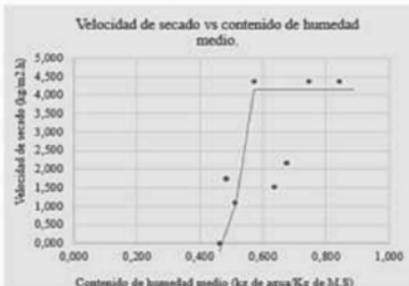
Tiempo	Altura del lecho (cm)		Altura del lecho (promedio)	Frecuencia	Velocidad	Velocidad
	L1	L2			de entrada del aire	de salida del aire
min	L1	L2	cm	Hz	m/s	m/s
0	11,5	1mf		48	15,75	
10	12,5	15	12,75			
20	13	14	13,5			
30	14	16	15			
40	15	18	16,5			15,5
50	18	20	19	50	16,41	
60	18	22	20			
70	18	24	21			
80	19	26	22,5			

RESULTADOS

CURVA DE CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CACAO



CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO DEL CACAO



ANÁLISIS DE RESULTADOS

De las pruebas experimentales realizadas con el cacao se determinó que inicialmente contenía una humedad 47% base húmeda, y densidad de 1000 kg/m³, luego del proceso de secado se obtuvo una humedad final de 24,5% base húmeda, en un tiempo de 1 hora y 20 minutos, con un flujo másico de aire de 4279 Kg/h, y temperatura de bulbo seco de 70°C promedio. Obteniéndose una eliminación del 24% de la humedad. Se consideraron para esta prueba 4 libras de cacao, y con los datos experimentales se obtuvo el gráfico de velocidad de secado, observándose que se presentan periodos de velocidad constante y decreciente.

CONCLUSIONES

Una vez diseñado construido y puesto en marcha el equipo se realizaron distintas pruebas -preliminares y experimentales-, para determinar la operatividad del equipo, pruebas con distintos mate-

riales como cacao, alverja y café que determinaron la versatilidad del mismo, como se muestra en los análisis de resultados demostraron la efectividad del secador disminuyendo un 24% de humedad base húmeda del cacao, estos resultados confirman el buen funcionamiento y eficiencia del equipo y nos da una base sólida de información para futuras investigaciones.

El secador de lecho fluidizado posee un costo de construcción relativamente alto si se lo compara con algunos secadores convencionales que existen en el mercado, como el secador tipo túnel. Sin embargo, ese valor es compensado porque los tiempos de secado disminuyen considerablemente debido a la alta transferencia de masa y calor que existe en el secador de lecho fluidizado, agregando también que estos secadores tienen la facilidad de poder trabajar el material húmedo hasta su máxima temperatura soportada, debido a que los tiempos de estancia de los mismos son muy bajos.

Referencias bibliográficas

- A. Casp, J. Abril. *Procesos de Conservación de alimentos*. Madrid: Mundi Prensa, 2003.
- Banchero, Badger. *Operaciones Unitarias*. 1990.
- Cao, Eduardo. *Transferencia de calor en ingeniería de procesos*. Primera. Argentina: , 2004.
- D, Geldart. *Expansion of Gas Fluidized Beds*. s.l.: Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004.
- D, Geldart. *The Effect of Particle Size and Size Distribution on the Behavior of Gas Fluidized Beds*. s.l.: Powder Technology, 1972.
- ALTUNTAS, Ebubekir y YILDIZ, Mehmet. *Effect of moisture content on some physical and mechanical Properties of faba bean (Vicia faba L.)*. 2007, *Journal of Food Engineering*, págs. 78: 174-183.
- Epstein. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems "Liquid-Solids Fluidization"*. Nueva York: Marcel Dekker; W.-C. Yang 2003.
- Geankopolis. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 1998.
- Geldart, D. *Types of gas fluidization*. s.l.: Powder Techno, 1973.
- Kunii D, Levenspiel O. *Fluidization Engineering*. USA: Butterworth-Heinzmann, 1991. Machado, Julio Ospina. *Características Físico-Mecánicas y análisis de calidad de granos*. Colombia: s.n., 1999.
- Maupoey, Pedro. *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. 2001.
- McCabe, Warren. *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. 1998.
- Nonhebel. *Secado en la Industria Alimenticia*. 1979.
- Perry. *Manual del Ingeniero Químico*. 1984.
- Rahman. *Hand book of Food Preservation*. New York: Marcel Dekker, Inc. New York U.S.A., 1999.
- DURSUN, I. y TUGRUL, K.M. y DURSUN, E.S *me physical properties of sugarbeet seed*. 2007, *Journal of Stored Products Research*, págs. 43: 149-155.
- Treybal. *Operaciones de Transferencia de masa*. 1993.
- Wen, Yu. 1966. *A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity*. Nueva York: AIChE J, 1966.
- Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar. *Transferencia de calor y masa-Fundamentos y aplicaciones*. 4. Mexico: Mc GrawHill, 2011.