

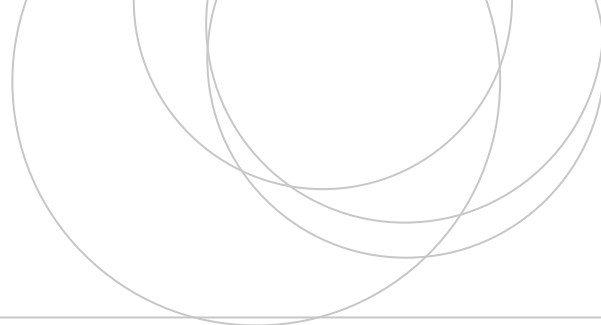
eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

ZIENTZIA
ETA TEKNOLOGIA
FAKULTATEA
FACULTAD
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Estudio de segregación de mezclas de biomasa en spouted bed cónicos.

Autor/a:
María Chaparro

Director/a:
María José San José

Leioa, 21 de Junio de 2019

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. RESUMEN Y OBJETIVOS..... | 1 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 2 |
| 2.1. ORIGEN HISTÓRICO..... | 2 |
| 2.2. SPOUTED BED | 2 |
| 2.2.1. Aplicaciones | 4 |
| 2.3. SPOUTED BED CÓNICO..... | 5 |
| 2.3.1. Fluidodinámica y diseño..... | 5 |
| 2.3.2. Criterios de diseño | 6 |
| 2.3.3. Correlaciones fluidodinámicas | 7 |
| 2.4. SEGREGACIÓN..... | 9 |
| 2.5. BIOMASA..... | 10 |
| 3. EXPERIMENTAL | 12 |
| 3.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO | 12 |
| 3.2. CONDICIONES EXPERIMENTALES..... | 13 |
| 3.3. MEDIDA DE PRESIÓN Y VELOCIDAD..... | 14 |
| 3.3. MEDIDA DE SEGREGACIÓN | 15 |
| 4. RESULTADOS..... | 17 |
| 4.1. EVOLUCIÓN DE LA PÉRDIDA DE CARGA CON LA VELOCIDAD | 17 |
| 4.2. MAPAS DE OPERACIÓN | 24 |
| 4.3. SEGREGACIÓN..... | 27 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 35 |
| 6. NOMENCLATURA..... | 37 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA | 39 |

1. RESUMEN Y OBJETIVOS

La técnica de Spouted Bed se creó en 1954 como un método alternativo a otros contactores convencionales como el lecho fijo y lecho fluidizado, permitiendo trabajar con sólidos gruesos, de textura irregular, de difícil manejo y sólidos adherentes.

Este método de contacto Spouted Bed en contactores cónicos dio comienzo en el Departamento de Ingeniería Química hace unos 30 años, y actualmente sigue en vías de desarrollo. En este trabajo se han estudiado las condiciones de operación con lechos de biomasa, determinando los valores experimentales de la velocidad mínima de spouting, la pérdida de carga máxima y la pérdida de carga estable, para después obtener los mapas de estabilidad. El estudio de estabilidad se ha realizado con el objeto de conocer las condiciones en las que tanto la mezcla binaria como los lechos uniformes son estables, para realizar la segregación y obtener los índices de mezcla.

El estudio de la segregación de lechos binarios de biomasa es fundamental, ya que una buena mezcla mejora la eficiencia de las operaciones y procesos. Se ha trabajado con granos de biomasa. El término grano se utiliza cuando se destina para la alimentación humana y animal, o como materia prima para la industria. Los granos de biomasa que se han utilizado en este trabajo han sido arroz, garbanzos, mijo, quínoa, avena y maíz.

Los objetivos fundamentales de este trabajo han sido:

- Determinación de los parámetros fluidodinámicos de lechos de granos de biomasa en un contactor spouted bed cónico.
- Determinación de las condiciones de operación estable de lechos uniformes y de mezclas binarias de granos de biomasa en el contactor cónico.
- Análisis de la segregación y obtención de los índices de mezcla de lechos binarios de diferentes granos de biomasa en el reactor.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. ORIGEN HISTÓRICO

Los términos de spouting y spouted bed se establecieron gracias a Gishler y Mathur (1955 a, b) en el National Research Council (NRC) de Canadá, y tenía como finalidad el desarrollo tecnológico del secado de grano, consiguiendo así describir el tipo de operación de sólidos en fase densa (Epstein y Grace, 2011).

El contactor spouted bed original se desarrolló en 1954 como un método alternativo del slugging fluidized bed, consiguiendo utilizar aire a una mayor temperatura que en los secadores de trigo en lecho fluidizado sin dañar el grano (Gishler y Mathur, 1957 a, b). Asimismo, se conseguía un mayor rendimiento con este tipo de contactor comparado con el contactor de lecho fluidizado (San José, 1991). Al darse cuenta de que esta técnica podría tener una aplicación más amplia, se desarrolló posteriormente en Canadá con lechos de una variedad de materiales sólidos y utilizando aire y agua como medios fluidos (Epstein y Grace, 2011).

En 1959 se publicó el libro de Leva llamado “Fluidization”, donde se resumían las investigaciones realizadas de la NRC en un capítulo titulado “Spouted bed”. En este tiempo el interés por esta técnica se extendió a otros países, y el libro fue traducido a diferentes idiomas como el ruso (1961) y el inglés (Zabrodsky, 1966). Dado el interés, en la Unión Soviética se abrieron varias líneas de investigación, donde se centraron mayormente en contactores cónicos en comparación con columnas cilíndricas con bases cónicas (Epstein y Grace, 2010).

Una vez publicado el libro de Mathur y Epstein (1974), hubo más de 250 publicaciones sobre spouted bed en países como Australia, Canadá, Francia, Hungría, India, Italia, Japón, Polonia, Rumania, Reino Unido, Estados Unidos, URSS y Yugoslavia. En 2011 el número de publicaciones superaba los 1.300 (Epstein y Grace, 2011).

Las primeras unidades comerciales de spouted beds se instalaron en Canadá en 1962, para el secado de guisantes, lentejas y lino (Epstein y Grace, 2011). Las unidades posteriores tuvieron finalidades en campos muy diferentes, como granulación de fertilizantes (San José, 1991).

2.2. SPOUTED BED

Los spouted beds son contactores, que utilizan la tecnología gas-sólido, que resultan ser apropiados para una gran variedad de operaciones de ingeniería. Esta tecnología es útil para reacciones donde el tamaño de la partícula cambia con el tiempo de residencia en el contactor (Olazar y cols., 1993c) y en aplicaciones donde se requiere un movimiento vigoroso del sólido, como es el uso en reactores (Olazar y cols., 2003).

Las principales características de los spouted beds cilíndricos de base cónica se muestran en la Figura 2.1. El aire se introduce por la parte inferior, orificio inferior, que asciende por el lecho cónico o cónico-cilíndrico donde se encuentran las partículas sólidas. El gas asciende por el lecho, generando un orificio central llamado spout. Las partículas del lecho son arrastradas por el gas ascendiendo por la zona central, spout, generando en la parte superior del lecho una fuente. Posteriormente, las partículas vuelven a introducirse en el lecho rodeando al spout generando la zona anular descendiente, la cual va en contracorriente con el gas. Es decir, las partículas del lecho siguen un movimiento cíclico en surtidor. Así, se diferencian tres zonas en el lecho, zona de spout, zona anular, que rodea al spout, y zona superior, fuente.

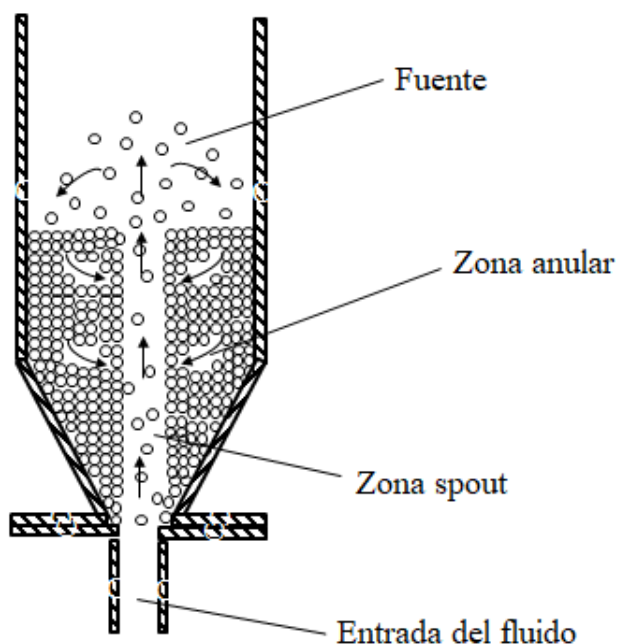


Figura 2.1. Esquema y zonas del spouted bed.

Los contactores spouted beds son una alternativa a otro tipo de contactores gas-sólido tal como el de lecho fluidizado, por lo que presentan una gran cantidad de ventajas respecto a este último (San José, 1991; Aguado, 1999):

- Sirven para trabajar con lechos de partículas con un diámetro mayor a $500\mu\text{m}$, ya que el contacto gas-sólido en reactores spouted beds es mayor, puesto que el gas atraviesa la zona anular y desplaza las partículas de la zona spout-anular, favoreciendo así la transferencia de calor y de materia. La utilización de partículas menores a las mencionadas dificulta el trabajo, ya que el movimiento cíclico que lleva el sólido se ve alterado.
- En los spouted beds se genera una fuerza vertical en el spout, que soporta parcialmente el lecho, y como consecuencia, se consigue una menor pérdida de carga que la del lecho fluidizado.
- Se puede utilizar el spouted bed para el procesado de materiales que se aglutinan, ya que la acción de agitación ejercida en el spout es eficaz en la ruptura de los aglomerados de estos materiales.
- Este tipo de reactores spouted beds no requieren de placa distribuidora ni otro tipo de distribuidor de aire, permitiendo así un diseño más sencillo.
- Permite operar de manera continua, alimentando el sólido bien por la zona anular o por la base junto con el aire, que es una ventaja respecto al lecho fluidizado.
- Se puede trabajar con materiales sensibles térmicamente, ya que en la zona anular cuando el sólido y el gas circulan en contracorriente se evita que la temperatura del sólido aumente o disminuya bruscamente.
- Estos contactores son de gran utilidad para el procesado de materiales de diferente tamaño, más concretamente para distribuciones discretas. Operar a una velocidad mayor a la de arrastre, asegura una buena circulación del sólido por las tres zonas del lecho, evitando así que

las partículas sedimenten. Cabe destacar, que cuando la base del contactor es cónica se evita la formación de zonas muertas.

De igual manera que los contactores spouted beds presentan una serie de ventajas, también tienen unas restricciones en su uso en comparación con el lecho fluidizado (Aguado, 1999), tal como, dificultad para trabajar con partículas de un diámetro menor a 500 μm (San José, 1991).

A lo largo del tiempo se han ido realizando modificaciones sobre el diseño convencional de los contactores spouted beds. Entre las variantes de diseño más usuales se encuentran las siguientes: geometría externa del contactor (cilíndrica de base plana, cilíndrica de base cónica o cónica), mecanismos de spouting (neumático, mecánico y vibratorio), dispositivos internos (tubo central interno y placas divisoras o dispositivos activos), partículas del lecho (activas o inertes), sección transversal del lecho y por último, configuraciones combinadas (lecho spout-fluidizado o jets en lecho fluidizado) (San José, 1991; Aguado, 1999).

2.2.1. Aplicaciones

Las diferentes aplicaciones que pueden tener los contactores spouted beds se muestran en la Tabla 2.1, diferenciando las operaciones de procesos químicos y procesos físicos (San José, 1991; Aguado, 1999; Olazar y cols., 2011).

Tabla 2.1. Algunas aplicaciones del contactor gas-sólido.

| Procesos químicos | Procesos físicos |
|---|---|
| Recubrimiento de partículas de combustibles nucleares | Precalentamiento de carbón |
| Reacción-granulación | Refrigeración de fertilizantes |
| Pirólisis de pizarras bituminosas | Mezclado de sólidos |
| Pirólisis de carbón a baja temperatura | Pulverización |
| Activación de carbón | Secado de materiales granulares |
| Gasificación de carbón y biomasa | Granulado |
| Reducción de mineral de hierro | Secado de suspensiones |
| Recuperación de vanadio por tostación de mineral | Recubrimiento de comprimidos |
| Craqueo térmico | Recuperación de aerosoles y regeneración de aerosoles |
| Combustión de residuos agrícolas | Secado de lodos residuales |
| Pirólisis de biomasa | Secado de biomasa |
| Gasificación de biomasa | |
| Producción de Clinker de cemento | |
| Combustión de combustible sólido o líquido | |
| Pirólisis de residuos plásticos | |

2.3. SPOUTED BED CÓNICO

La geometría exclusivamente cónica presenta una serie de ventajas respecto del spouted bed original, tales como, la sencillez en la construcción, su diseño, una menor pérdida de carga (San José, 1991; Erkiaga, 2014) y permite aumentar la capacidad del lecho por unidad de sección transversal (San José, 1991). Debido a la gran versatilidad en el intervalo de caudal del gas que ofrece este diseño, se puede operar con partículas finas, de textura irregular, y sólidos de difícil manejo, con distribución de tamaño de partícula (Amutio, 2011) y con tiempos de residencia del gas cortos (San José, 1991; Amutio y cols., 2012). Además, este tipo de reactor es apropiado para operar de manera continua (Amutio y cols., 2012) y se minimizan los problemas de segregación con sólidos de diferente tamaño y densidad (San José y cols., 1994).

2.3.1. Fluidodinámica y diseño

En las Figura 2.2 se muestra la expansión del lecho mediante la evolución de la velocidad del aire con respecto a la pérdida de carga, donde se diferencian cuatro zonas denominadas a, b, c y d. De la misma manera, en la Figura 2.3 se muestra el estado de las partículas en cada una de las cuatro zonas mencionadas (San José, 1991).

Inicialmente, la pérdida de carga aumenta considerablemente a medida que aumenta la velocidad del aire, manteniéndose el lecho fijo. Al superar la velocidad que corresponde a la pérdida de carga máxima, esta desciende bruscamente, correspondiendo al momento en el que el aire canaliza en el lecho (spouting incipiente). A velocidades superiores, la pérdida de carga se mantiene constante, alcanzado así la estabilidad en el lecho. Aumentando aún más la velocidad del aire, se encuentra la zona llamada transición, donde a medida que la pérdida de carga disminuye, se aprecia con dificultad la diferencia entre la zona spout y la zona anular. La pérdida de carga continúa descendiendo en esta zona de transición hasta estabilizarse, llegando así al régimen de spouted bed diluido o jet spouted bed.

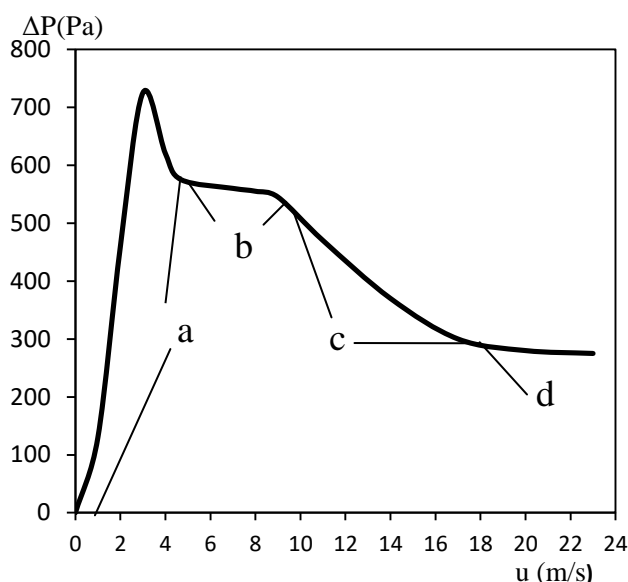


Figura 2.2. Evolución de la pérdida de carga con la velocidad en el lecho cónico.

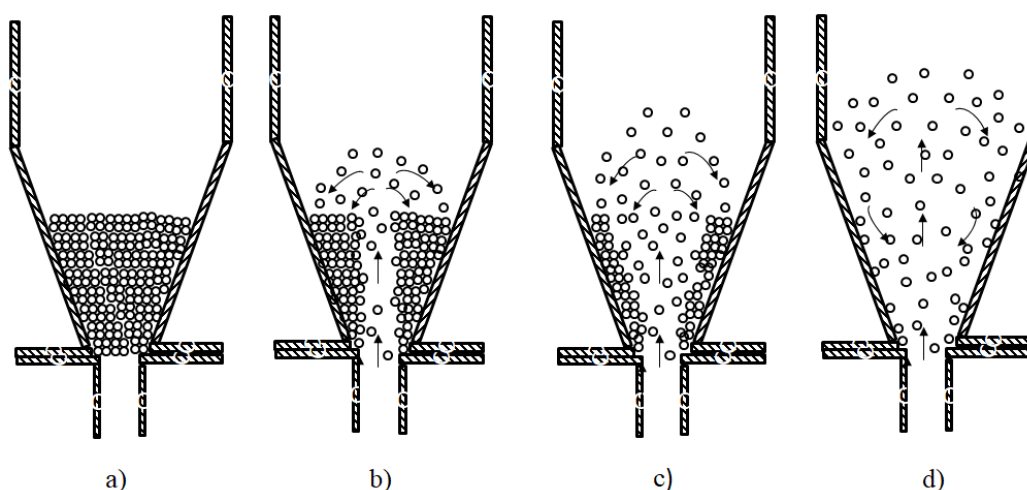


Figura 2.3. Situación de las partículas en un contactor cónico al aumentar la velocidad del gas.

2.3.2. Criterios de diseño

En anteriores estudios realizados de los spouted beds cónicos utilizando partículas de diferentes materiales, así como, esferas de vidrio, legumbres, cerámicas, madera, granos, se establecieron los intervalos de los factores geométricos del contactor y del sistema contactor-partícula (San José, 1991):

-Relación diámetro de entrada del aire/diámetro de la base del cono, D_0/D_i

Los regímenes que se alcanzan en los contactores de spouted beds cónicos dependen de la relación entre el diámetro de la entrada del aire (D_0) y el diámetro inferior del contactor (D_i), debiendo estar entre $1/2$ y $5/6$. El límite inferior está impuesto por la formación de zonas muertas y la pérdida de carga, mientras que en el caso del límite superior es por la inestabilidad del lecho con movimientos de rotación.

- Angulo del cono, γ

No existe un límite superior para spouted bed del ángulo del cono, γ , el cual podría aumentarse hasta la geometría cilíndrica. Sin embargo, la utilización de ángulos superiores a 45° dan lugar a lecho estancado en la pared, salvo a velocidades de aire correspondientes a un estado de transición avanzado. El límite inferior, en cambio, es de 25° , puesto que al operar con ángulos menores el lecho es inestable, siendo recomendable trabajar con una relación D_0/D_i menor a $1/2$.

- Relación diámetro de la entrada del aire/diámetro de la partícula, D_0/d_p

Se puede trabajar con una relación del diámetro de entrada del aire (D_0) y el diámetro de la partícula (d_p) comprendida entre 2 y 60, donde se consiguen operaciones estables.

A partir del conocimiento de los límites de la relación D_0/d_p , se puede definir la aplicabilidad de estos contactores cónicos. Para ello, se utiliza la Figura 2.4 en la que se muestra la aplicabilidad de los contactores convencionales de gas-sólido. Este mapa fue creado por Grace (1986), donde se representa el módulo de velocidad (u^*) frente al módulo del tamaño-densidad de las partículas (d_p^*).

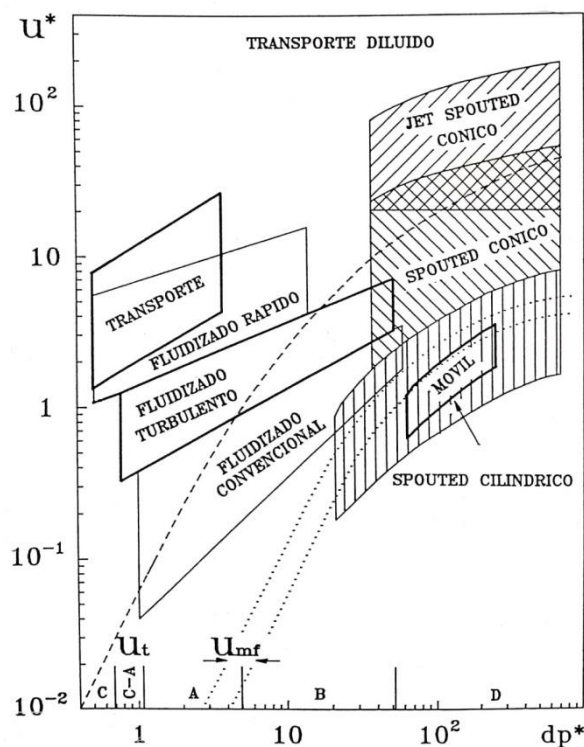


Figura 2.4. Aplicabilidad de los diferentes contactores gas-sólido.

El intervalo de condiciones de aplicabilidad es diferente en spouted beds cónicos en comparación con los contactores cilíndricos, ya que se encuentra en una altura superior en la Figura 2.4. De esta manera, se puede trabajar con partículas pesadas y de tamaño grande, del grupo D de la clasificación de Geldart (1986), y velocidades del gas próximas a la fluidización rápida (San José, 1991).

2.3.3. Correlaciones fluidodinámicas

Tras realizar un estudio fluidodinámico a escala de planta piloto, con diferentes geometrías y condiciones, se obtuvieron las siguientes correlaciones:

- Para el cálculo de la velocidad mínima de spouting, se ha propuesto la siguiente ecuación (Olazar y cols., 1992):

$$(\text{Re}_o)_{ms} = 0.126 \text{Ar}^{0.5} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{1.68} \left[\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]^{-0.57} \quad (2.1)$$

- Para el cálculo de la pérdida de carga máxima (Olazar y cols., 1993a):

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_s} = 1 + 0.116 \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.5} \left[\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]^{-0.8} \text{Ar}^{0.0125} \quad (2.2)$$

- Para el cálculo de la pérdida de carga en régimen estable (Olazar y cols., 1993a):

$$-\frac{\Delta P_s}{H_0 \rho_B g} = 1.20 \left[\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]^{-0.11} \text{Re}_o^{-0.06} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.08} \quad (2.3)$$

- Para el cálculo de la porosidad mínima de spouted bed (San José y cols., 1993):

$$\frac{(\varepsilon_{ms}-\varepsilon_0)}{(1-\varepsilon_{ms})} = 3.40 \left(\frac{F_D}{F_G}\right)^{0.272} \left(\frac{D_B}{D_0}\right)^{-0.795} \gamma^{0.857} \quad (2.4)$$

donde F_D/F_G se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{F_D}{F_G} = \frac{3}{4} C_D \left(\frac{Re^2}{Ar}\right) \quad (2.5)$$

siendo

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + Re^{0.687}) \quad (2.6)$$

- Para el cálculo de la expansión del lecho poroso (San José y cols., 1993):

$$\frac{(\varepsilon-\varepsilon_0)}{(1-\varepsilon)} = 215 \left(\frac{F_D}{F_G}\right)^{1.74} \left(\frac{D_B}{D_0}\right)^{1.35} \gamma^{1.95} \quad (2.7)$$

- Para calcular el dimensionado del diámetro superior del contactor (en función de la altura del lecho estancado) (Olazar y cols. 1993b):

$$D_c^3 = D_b^3(1+\psi) - D_i^3\psi \quad (2.8)$$

donde:

$$\begin{aligned} \psi = \psi_s = & 8.94 \cdot 10^2 u_r^{1.74} Ar^{-0.87} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{0.793} \left[\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]^{-0.992} \gamma^{1.95} \\ & \left\{ 1 + 0.036 u_r^{0.687} Ar^{0.344} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{-0.22} \left[\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]^{-0.392} \right\}^{1.74} \end{aligned} \quad (2.9)$$

- Existe una altura mínima del lecho estancado $(H_o)_m$, puesto que la velocidad media del fluido referida al diámetro del contactor varía con la altura. Por debajo de la altura mínima del lecho, la velocidad en la parte superior es superior a la mínima de fluidización, y por consecuencia, el lecho es inestable. Para calcular la altura mínima del lecho estancado (Olazar y cols., 1993b):

$$(H_o)_m = 1.41 \cdot 10^{-11} [(\rho_s - \rho)]^{2.75} \left(\frac{D_i}{D_0}\right)^{-0.47} \left(\frac{D_0}{d_p}\right)^{0.63} \left[\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]^{-0.3} \quad (2.10)$$

- San José y cols. (2005) al filmar partículas coloreadas y hacer un tratamiento informático a estas filmaciones pudieron medir la altura, H_f , y la anchura de la fuente, A_f . De este modo, propusieron las siguientes correlaciones:

$$H_f = 1.01 \cdot 10^{-2} \gamma^{-0.14} \left(\frac{D_0}{D_i}\right)^{-1.14} \left(\frac{d_p}{D_0}\right)^{-0.83} \left(\frac{H_0}{D_i}\right)^{-0.52} \left(\frac{u}{u_{ms}}\right)^{4.80} \rho^{-0.12} \phi^{-1.45} \quad (2.11)$$

$$A_f = 0.47 \gamma^{0.85} \left(\frac{D_0}{D_i}\right)^{0.29} \left(\frac{d_p}{D_0}\right)^{0.43} \left(\frac{H_0}{D_i}\right)^{0.69} \left(\frac{u}{u_{ms}}\right)^{2.20} \rho^{-0.21} \phi^{1.22} \quad (2.12)$$

- El spout sigue una trayectoria desde la entrada del gas hasta la fuente, sufriendo un estrechamiento en una posición longitudinal intermedia. Para el cálculo del diámetro medio del spout San José y cols. (2005) propusieron la siguiente correlación, después de realizar un estudio con una sonda de fibra óptica para la medición del perfil longitudinal del spout:

$$\overline{D_s} = 0.52 G^{0.16} D_0^{0.41} \gamma^{-1.19} D_b^{0.8} u_r^{0.8} \quad (2.13)$$

2.4. SEGREGACIÓN

Es de gran importancia el estudio de la mezcla y segregación de las partículas del lecho, puesto que estos procesos influyen de gran manera en la calidad del movimiento del lecho (Kiani y cols. 2015), sobre todo porque durante el proceso, las partículas de densidades y tamaños diferentes tienden a separarse. Se han realizado diferentes estudios por varios autores, demostrando así que el mezclado está influenciado por tres factores: la velocidad de spouting, las propiedades de las partículas y la forma del sólido (Kiani y cols., 2015).

Un estudio realizado por Ren y cols. (2012) demostró que en el estudio del comportamiento de mezclas binarias había tres fases: macro-mezcla, micro-mezcla y mezcla-estable.

Kiani y cols., (2015) publicaron que aumentando la velocidad del aire y siendo mayor que la velocidad mínima de spouting, la fracción másica de las partículas grandes cambia de una variación no-uniforme a otra uniforme. Por lo tanto, se podría suponer que un aumento en la velocidad del aire supone una mejoría en la mezcla, debido a la buena movilidad de las partículas grandes (llamadas jetsam teóricamente) en valores altos de u/u_{ms} y una disminución en la segregación de lechos de vidrio (San José, 1994). Esto se debe a que el movimiento de las partículas aumenta a mayores velocidades del aire. Por otro lado, Wang y cols. (2015) mostraron que a menores velocidades del aire, se podía observar que la segregación ocurría, puesto que la velocidad del aire ocupa un papel dominante en la separación de componentes en mezclas binarias.

Otro de los factores mencionados es el tamaño de la partícula. Un aumento en el tamaño de las partículas de los sólidos en mezclas binarias, permite que la fracción másica de las partículas grandes se encuentre en el centro del lecho y parte superior del mismo (Kiani y cols., 2015). Las partículas finas, en cambio, se encuentran en mayor concentración en la zona de la pared. De esta manera, en un lecho binario de diferente tamaño de partículas, las partículas finas se encuentran mayormente en la zona anular y las gruesas en la zona spout (San José, 1994; Kiani y cols., 2015), consiguiendo así una trayectoria más larga de las partículas finas (San José, 1994).

Otro estudio realizado por Hao y cols., (2008) mostraron idénticas conclusiones.

En definitiva, la segregación de lechos binarios de esferas de vidrio atenúa cuando la relación D_0/D_i aumenta o cuando H_0 disminuye (San José y cols., 1994).

Para cuantificar la segregación San José y cols. (1994) obtuvieron una correlación del índice de mezcla en función de los factores geométricos del lecho y del contactor y variables de operación:

$$M=1+6.59 \cdot 10^{-3} (d_R-1)^{2.42} \exp \left[\frac{(0.46-2.1D_0^*)}{H_0^*} \right] \exp \left[-41.1(d_R-1)^{2.42} (X_B-0.5)^2 \right] \exp [-3.61(u_R-1)] \quad (2.14)$$

donde los diferentes factores geométricos se definen con las siguientes ecuaciones:

$$H_0^* = \frac{H_0}{H_c} \quad (2.15)$$

$$D_0^* = \frac{D_0}{D_i} \quad (2.16)$$

$$d_R = \frac{d_B}{d_S} \quad (2.17)$$

X_B corresponde al promedio de las fracciones en peso de las partículas más grandes a cada altura h del lecho (San José y cols., 1994):

$$(\overline{X_B})_h = \frac{\sum_0^r [\Delta r \sum_0^{2\pi} (X_B r \Delta \theta)]}{\sum_0^r [\Delta r \sum_0^{2\pi} (r \Delta \theta)]} \quad (2.18)$$

La velocidad relativa del aire, u_R , está en función de la velocidad mínima de spouting, la cual se obtiene mediante la ecuación (2.1):

$$u_R = \frac{u}{u_{ms}} \quad (2.19)$$

2.5. BIOMASA

La preocupación por el continuo uso y agotamiento de los combustibles fósiles dio pie a buscar nuevas fuentes de energía, así como energías renovables (Romero, 2010). Entre ellas y como una de las mayores materias primas con interés energético (Camia y cols., 2018), se encuentra la biomasa, que se define como un amplio conjunto de materias orgánicas, vegetales o animales que se generan en un proceso biológico (Aguado, 1999). Es por esto, que su demanda estos últimos años ha aumentado considerablemente y se hace necesario un estudio de su comportamiento (Camia y cols., 2018). Su uso no solo es energético, también tiene un amplio rango de aplicaciones tales como, la industria farmacéutica y textil.

Debemos distinguir entre los diferentes tipos de biomasa que existen dependiendo de su origen (de Lucas y del Peso, 2012):

1. Biomasa natural, es aquella que se produce de manera espontánea en la naturaleza (bosques, matorrales, etc...) sin la intervención humana, como por ejemplo, la leña o las ramas. Su explotación no es recomendable por razones económicas (biomasa, biocombustible).
2. Biomasa residual, producida por los residuos generados por la actividad humana (en explotaciones forestales, agrícolas, ganaderas, industriales o basuras) y aquellos vertidos denominados biodegradables. Se clasifican en secos y húmedos, o en sólidos y líquidos.

Cabe destacar, que la biomasa no es una materia orgánica fácilmente desechable, por lo que convertir estos residuos en un recurso energético está en el punto de mira.

Cuando se trabaja con partículas de biomasa residual, es importante clasificarlas. Geldart, (1978, 1986), estudió la fluidización de sólidos grandes de diferentes tamaños y tipos, y destacó que existían cuatro tipos diferentes de partículas:

- Grupo A: Estas partículas se fluidizan de manera fácil, y pueden ser aireadas. A bajas velocidades se puede lograr una fluidización suave. Este tipo de partículas se caracterizan por tener un diámetro pequeño y/o una baja densidad.
- Grupo B: Son partículas que fluidizan bien, donde se forman burbujas vigorosas al superar la velocidad mínima y pueden llegar a tener un tamaño considerable.
- Grupo C: Es complicado lograr una buena fluidización, ya que son polvos o partículas cohesivas, y es difícil romper las fuerzas entre partículas. Así como, harina, almidón, etc.
- Grupo D: Por norma general, el gas se canaliza, y se requieren grandes cantidades de aire para lograr la fluidización. A pesar de eso, se consiguen lechos estables, considerados spouted beds.

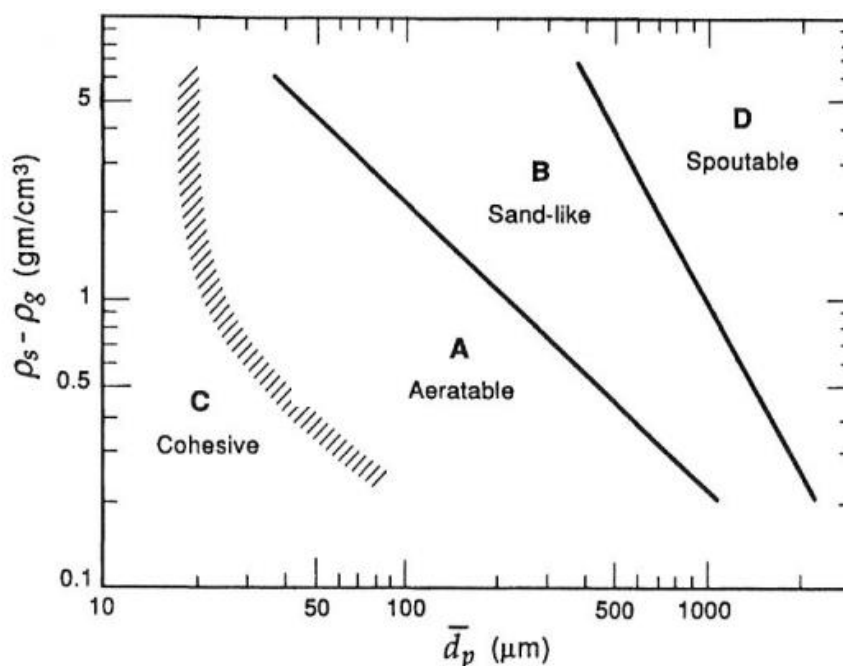


Figura 2.5. Clasificación de los sólidos por Geldart.

3. EXPERIMENTAL

Con objeto de realizar el estudio de la fluidodinámica de lechos binarios de materiales sólidos, su estabilidad y segregación, se ha utilizado una instalación provista de un contactor cónico.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

En la Figura 3.1 se muestra un esquema del equipo utilizado para el estudio. La unidad consta de una soplante, que suministra un caudal de aire de hasta $250 \text{ m}^3/\text{h}$ a una presión de 1500 mm c.a. El caudal de aire se mide mediante dos rotámetros, en intervalos de 0 a 30 y de 30 a $250 \text{ m}^3/\text{h}$. El caudal se controla mediante el ordenador, ya que este permite suministrar más o menos cantidad.

Para medir la pérdida de carga del lecho se utilizan dos sondas. Una de ellas está situada a la entrada del caudal de aire, mientras que la otra, se puede disponer dentro del contactor como se desee. El equipo dispone de un manómetro de agua que está conectado a los extremos del tubo en U del manómetro y permite medir la pérdida de carga del lecho en $\text{mm de H}_2\text{O}$.

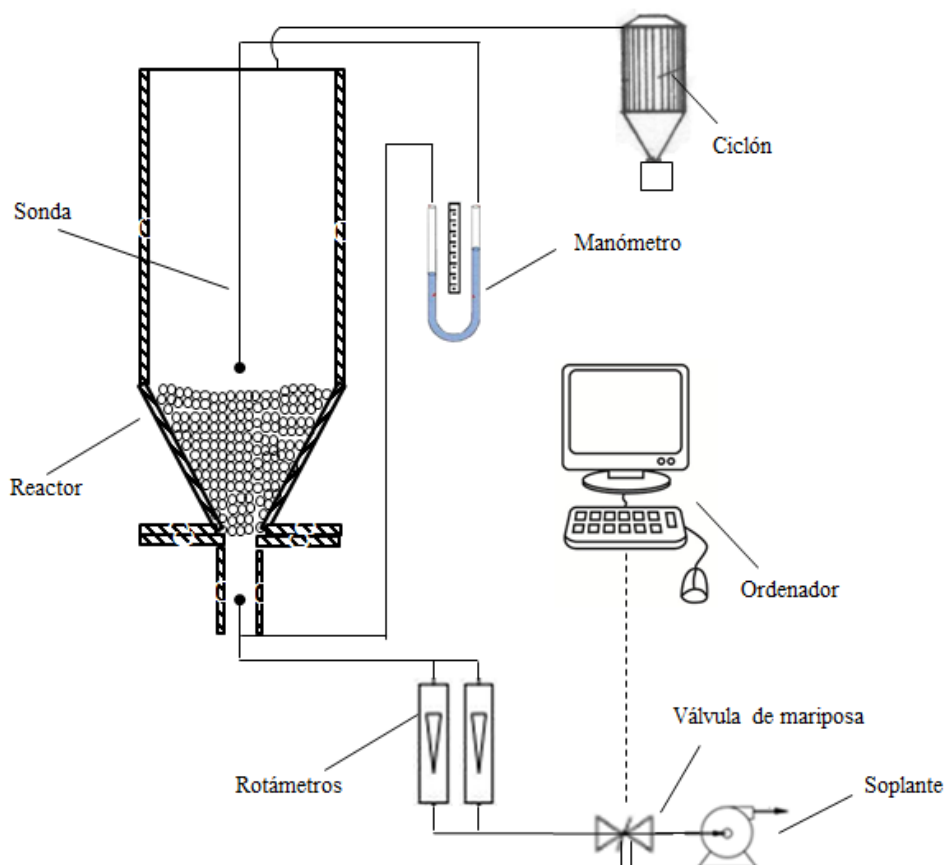


Figura 3.1. Esquema del equipo utilizado.

En la Figura 3.2. se muestra el dispositivo utilizado para la recogida de sólidos en el estudio de segregación. Además, se dispone de una sonda de aspiración para la recogida de capas completas del lecho de una determinada altura.

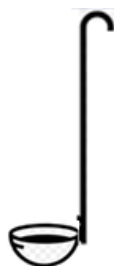


Figura 3.2. Dispositivo de recogida puntual de sólidos.

3.2. CONDICIONES EXPERIMENTALES

Para llevar a cabo este experimento, se ha utilizado un contactor de base cónica, del cual se fijan sus parámetros en la Figura 3.3.

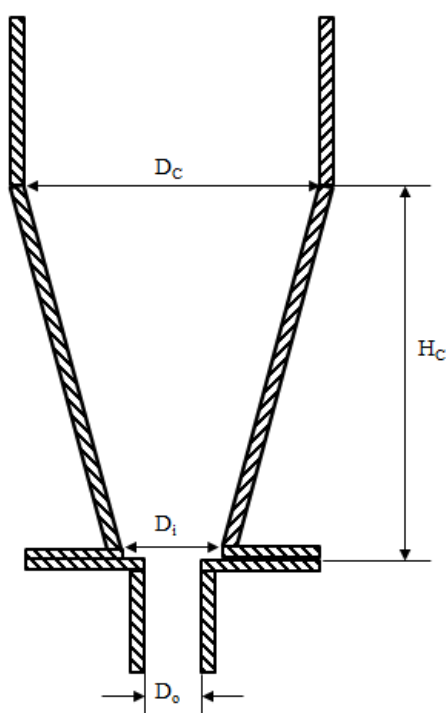


Figura 3.3 Factores geométricos del contactor.

El ángulo de la base cónica, γ , del contactor utilizado es 36° , mientras que el diámetro de la columna, D_c , es 0,15 m, la altura del tronco del cono, H_c , es de 0,14 m y el diámetro de la base del contactor, D_i , es 0,06 m. En cuanto al diámetro de entrada del aire, D_o , se han utilizado dos diferentes siendo 0,04 m y 0,03 m.

Los sólidos utilizados son avena, quínoa, garbanzos, maíz, arroz y mijo. En la Tabla 3.1 se describen las características de los sólidos utilizados así como su densidad, su diámetro de partícula, la esfericidad y su clasificación de Geldart.

Tabla 3.1. Propiedades de los sólidos utilizados.

| Sólidos | ρ_s (kg/m ³) | d_p (10 ⁻³ m) | ϕ | Clasificación de Geldart |
|-----------|-------------------------------|----------------------------|--------|--------------------------|
| Avena | 1282 | 4,29 | 0,71 | D |
| Quínoa | 1019 | 1,78 | 0,93 | D |
| Mijo | 1200 | 2,22 | 0,99 | D |
| Arroz | 1250 | 3 | 0,60 | D |
| Garbanzos | 1256 | 11,32 | 0,90 | D |
| Maíz | 1290 | 7,19 | 0,77 | D |

Se ha optado por estudiar la segregación de mezclas de los sólidos de la Tabla 3.1, por su tamaño, no excesivamente pequeño, y su consistencia. En la Tabla 3.2 se ha definido la composición de las mezclas utilizadas y se ha enumerado cada una de ellas.

Tabla 3.2. Composición y diámetro de Sauter de las mezclas estudiadas.

| %Peso | | | |
|-------|----------------|---------------|-------------|
| no. | $d_B=11,32$ mm | $d_S=3$ mm | \bar{d}_s |
| 1 | 50 | 50 | 4,74 |
| %Peso | | | |
| no. | $d_B=7,19$ mm | $d_S=3$ mm | \bar{d}_s |
| 2 | 50 | 50 | 4,23 |
| %Peso | | | |
| no. | $d_B=2,22$ mm | $d_S=1,47$ mm | \bar{d}_s |
| 3 | 50 | 50 | 3,44 |
| %Peso | | | |
| no. | $d_B=11,32$ mm | $d_S=7,19$ mm | \bar{d}_s |
| 4 | 20 | 80 | 7,75 |
| 5 | 50 | 50 | 8,79 |
| 6 | 80 | 20 | 10,15 |

3.3. MEDIDA DE PRESIÓN Y VELOCIDAD

La medida de la pérdida de carga del lecho de cada sistema experimental, se calcula a partir del valor de la pérdida de carga total del lecho, medida con el manómetro de agua, restándole el valor de la pérdida de carga correspondiente a la rejilla a la velocidad experimental del aire, medida también con manómetro de agua en el contactor vacío. Se obtienen los resultados del caudal de aire mediante dos rotámetros, midiendo el rotámetro pequeño un caudal de 0 a 30 m³/h y el rotámetro grande de 30 a 250 m³/h.

La pérdida de carga de la rejilla se obtiene con el contactor vacío, es decir, sin lecho, e introduciendo aire en el mismo partiendo de cero hasta el valor máximo de caudal que permite la soplante. En la Figura 3.4 se muestra, a modo de ejemplo, la curva experimental de la pérdida de carga de la rejilla respecto del caudal con un diámetro de entrada del aire, D_0 , de 0,04 m.

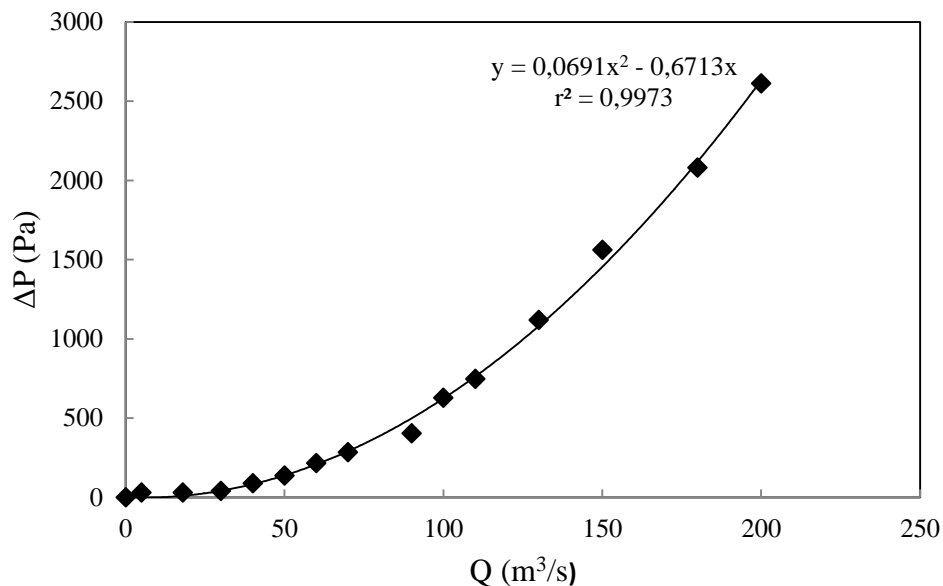


Figura 3.4. Evolución de la pérdida de carga de la rejilla en diferentes caudales del aire sin lecho.

Para la medida de la velocidad del gas se tiene en cuenta la relación que hay entre el caudal y la sección de entrada del aire. Asimismo, se puede analizar el comportamiento de los lechos de los diferentes sólidos de biomasa tales como la estabilidad, pérdida de carga correspondiente a la velocidad mínima del régimen spouted bed y la pérdida de carga máxima.

3.4. MEDIDA DE SEGREGACIÓN

Para el estudio de segregación de diferentes mezclas binarias de los sólidos seleccionados, se han preparado mezclas binarias a proporciones iguales (al 50% en peso cada material granular) y proporciones diferentes (20-80% en peso y 80-20% en peso de cada material granular). Se ha optado por mezclas de arroz y garbanzos, garbanzos y maíz, arroz y maíz y por último, mijo y quínoa.

Las mezclas se alimentan al contactor de manera que cubra toda la base cónica, es decir, 0,14 m. El estudio se realiza a la velocidad mínima de spouting, por lo que antes de coger cualquier muestra para el análisis es necesario hacer un estudio de la estabilidad de cada mezcla. La velocidad mínima, se obtiene en la deceleración siendo la última velocidad a la que el lecho está en movimiento con aparición de fuente. De esta manera, se asegura que la fuente se mantenga estable.

Se hace pasar aire por los lechos de mezclas a la velocidad prefijada, de manera que se obtiene el movimiento deseado de los sólidos en spouted bed. Pasados unos minutos se realizan los análisis para la determinación del grado de segregación. En este caso, se han extraído muestras por capas. Es decir, si la altura del tronco del cono es de 0,14 m, se han

clasificado seis capas. La capa I es de 0,14 a 0,12 m, la capa II de 0,12 a 0,10 m, la capa III de 0,10 a 0,08 m, la capa IV de 0,08 a 0,06 m, la capa V de 0,06 a 0,04 m y por último, la capa VI de 0,04 a 0 m.

El procedimiento a seguir es el siguiente: se realizan análisis de cada capa repetidas dos veces, donde en cada una se coge una muestra de la pared, del medio anular y del centro. Después, se recoge toda la capa y se procede a pesar las cantidades de cada tipo de sólido que hay en las muestras. El primer análisis es de la capa I, una vez analizada la capa, se vuelve a alimentar al contactor de manera que no se produzca ningún cambio en el comportamiento del régimen estudiado de spouted bed. Pasados unos minutos, se recogen las capas I y II y se realizan los análisis de cada una de ellas. Una vez terminado, se devuelven al contactor y se repite el procedimiento. Al ser dos análisis por capa, la capa I ya no se analizaría y se procedería a analizar la siguiente.

4. RESULTADOS

Se ha realizado el estudio fluidodinámico con lechos de partículas de granos. La expansión del lecho ofrece información sobre la evolución del movimiento de las partículas en el mismo. Se ha determinado la evolución de la pérdida de carga con la velocidad del gas, aire, con lechos de partículas uniformes y con mezclas binarias.

Por otro lado, se han estudiado las condiciones de operación estable en diferentes lechos, tanto uniformes como lechos binarios.

Por último, se ha estudiado la segregación de diferentes mezclas binarias en diferentes proporciones de cada material granular.

4.1. EVOLUCIÓN DE LA PÉRDIDA DE CARGA CON LA VELOCIDAD

La expansión del lecho ofrece información sobre la evolución del movimiento de las partículas en el mismo. Para determinar el diseño del contactor y su aplicación en procesos u operaciones, se ha estudiado la evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire, utilizando lechos uniformes de arroz, garbanzos, maíz, avena, quínoa y mijo y con mezclas binarias de garbanzos-arroz y garbanzos- maíz en distintas proporciones de peso en la mezcla.

La Figura 4.1 muestra la evolución de la pérdida de carga con la velocidad del aire en un contactor cónico con un diámetro de entrada del aire, D_0 , de 0,04 m para cuatro alturas de lecho estancado, H_0 , 0,05 m, 0,08 m, 0,11 m y 0,13 m.

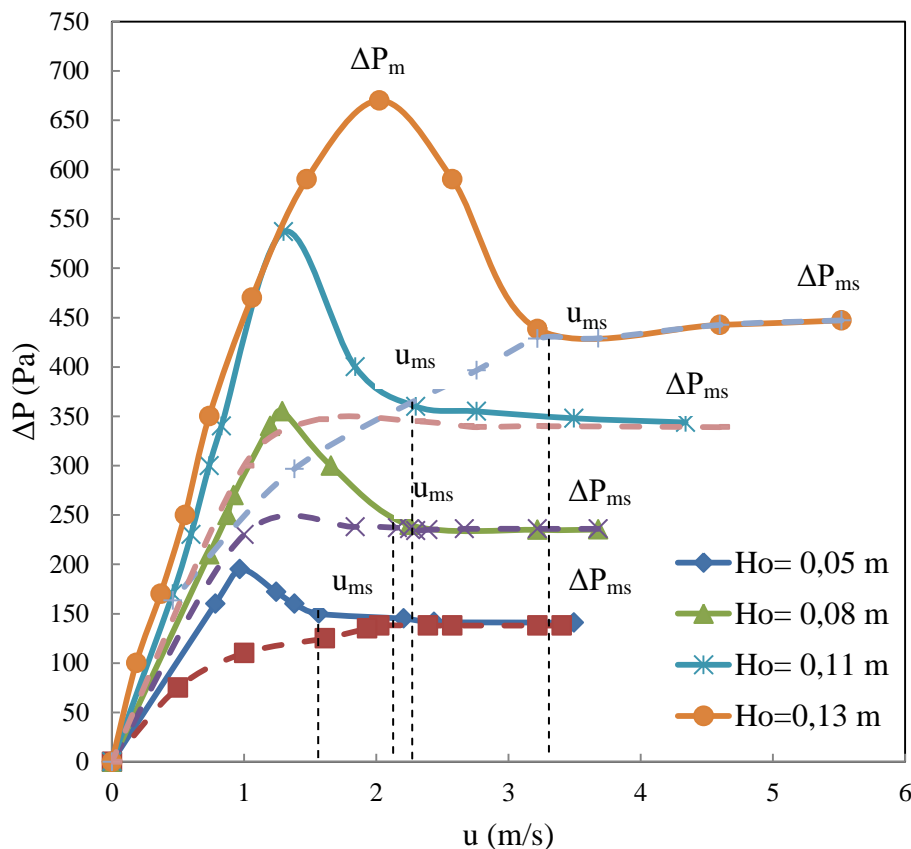


Figura 4.1. Evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire. Contactor: $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,04$ m. Lecho de arroz de $d_p=3$ mm y $H_0=0,05$, $0,08$, $0,11$ y $0,13$.

De la observación de esta figura, se determina que la forma de la curva de la evolución de la pérdida de carga con la velocidad del aire es similar, línea continua, así como, la evolución del descenso, línea a trazos. Se aprecia una gran histéresis de la pérdida de carga para estos lechos, partiendo del lecho fijo, es decir, sin flujo de aire ($u=0$ m/s). A medida que la velocidad del aire aumenta, la pérdida de carga aumenta hasta alcanzar un máximo. Después, existe una caída brusca, manteniendo constante la pérdida de carga con el aumento de velocidad.

Un aumento en la altura del lecho estancado, H_0 , aumenta los valores de pérdida de carga con la velocidad del aire.

Además, en la Figura 4.1 se han indicado la velocidad mínima de spouting, u_{ms} , la pérdida de carga correspondiente a esa velocidad, ΔP_{ms} y la pérdida de carga máxima, ΔP_m .

La velocidad mínima de spouting, u_{ms} , es mayor al aumentar la altura del lecho estancado, H_0 , así como la pérdida de carga correspondiente a esta situación, ΔP_{ms} . De igual manera, la pérdida de carga máxima, ΔP_m , se incrementa al aumentar la altura del lecho estancado.

En las Figuras 4.2- 4.4 se muestran los valores experimentales de la pérdida de carga frente a la velocidad del aire con un diámetro de entrada del aire al contactor, D_0 , de $0,04$ m, de lechos uniformes de garbanzos, maíz y avena para una altura del lecho estancado, H_0 , de $0,08$ m.

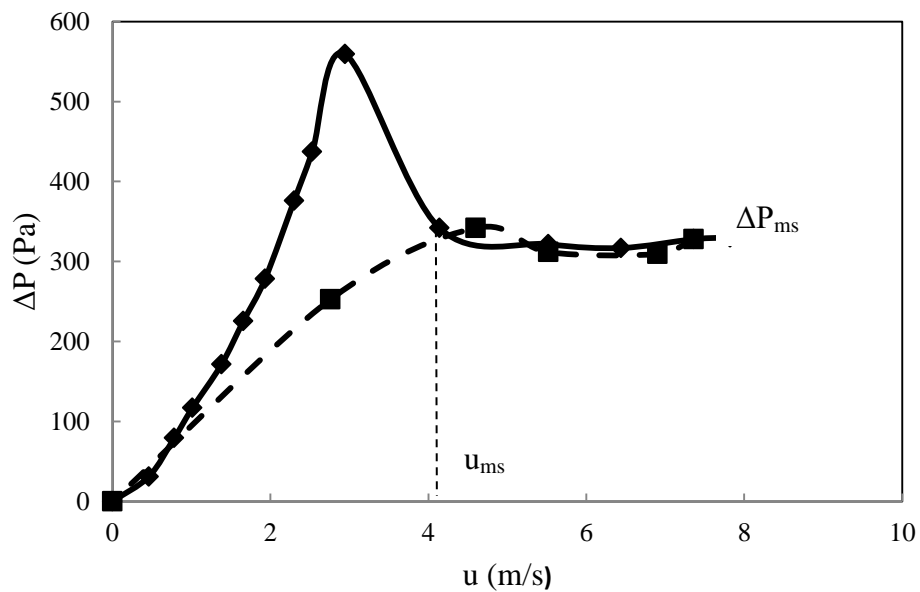


Figura 4.2. Evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire. Contactor: $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,04$ m, lecho de garbanzos de $d_p=11,32$ mm y $H_0=0,08$ m.

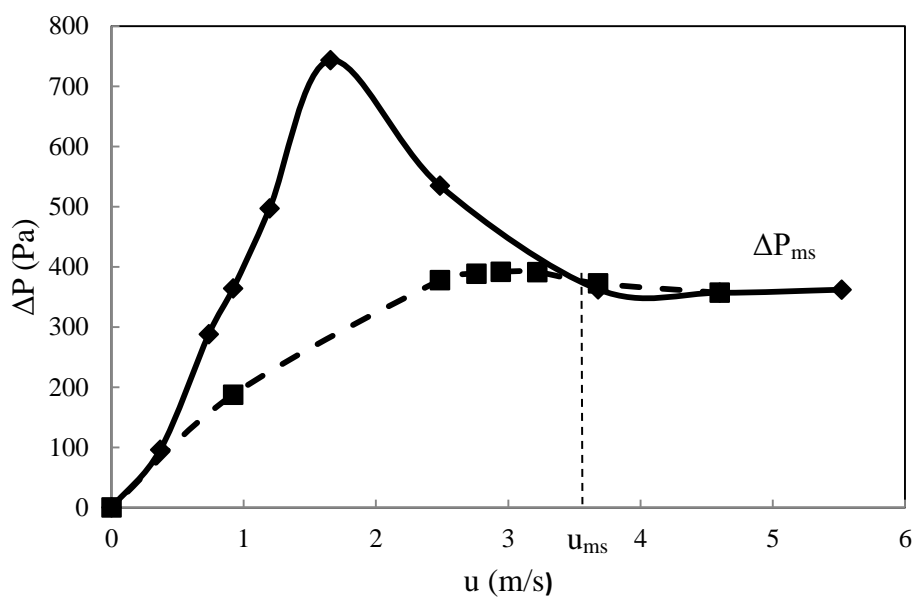


Figura 4.3. Evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire. Contactor: $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,04$ m, lecho de maíces de $d_p=7,19$ mm y $H_0=0,08$ m.

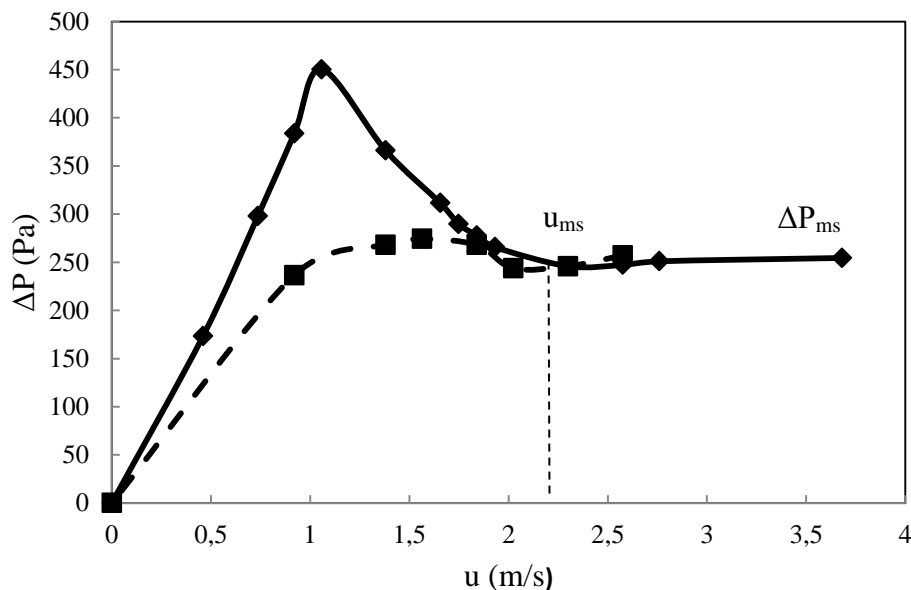


Figura 4.4. Evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire. Contactor: $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,04$ m, lecho de avena de $d_p=4,29$ mm y $H_0=0,08$ m.

Comparando los gráficos de evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire de la Figura 4.1, correspondiente a lechos uniformes de arroz, con la Figura 4.2, correspondiente a lechos uniformes de garbanzos (siendo $H_0=0,08$ m en los dos casos), se observa que para el lecho de garbanzos, que tiene una densidad similar que el arroz, el mayor diámetro de partícula de los garbanzos ($d_p=11,32$ mm) respecto a los granos de arroz ($d_p = 3$ mm), da lugar a una mayor velocidad mínima de spouting, y mayor pérdida de carga máxima ΔP_m y pérdida de carga estable ΔP_{ms} .

Asimismo, comparando los gráficos de las Figuras 4.3 y 4.4 correspondientes a lechos de maíz y avena, cuyas partículas tienen densidades similares, se extraen las mismas conclusiones respecto a la velocidad mínima de spouting y pérdida de carga máxima y estable.

Cabe destacar, que se ha observado experimentalmente que en el caso de lechos uniformes de avena, existe posibilidad de ruptura de partículas, atrición, modificándose el tamaño de algunas de las partículas del lecho, si bien no excede en un 15%.

Las Figuras 4.5 y 4.6 corresponden a curvas experimentales de la pérdida de carga con la velocidad para lechos de partículas uniformes de mijo y quínoa. Las curvas de evolución de pérdida de carga con la velocidad presentan oscilaciones de pérdida de carga, fundamentalmente debido a que estos lechos no son estables. Por esta razón, se ha realizado el estudio fluidodinámico con un diámetro de entrada, D_0 , menor que 0,04 m, es decir, con diámetro $D_0=0,03$ m.

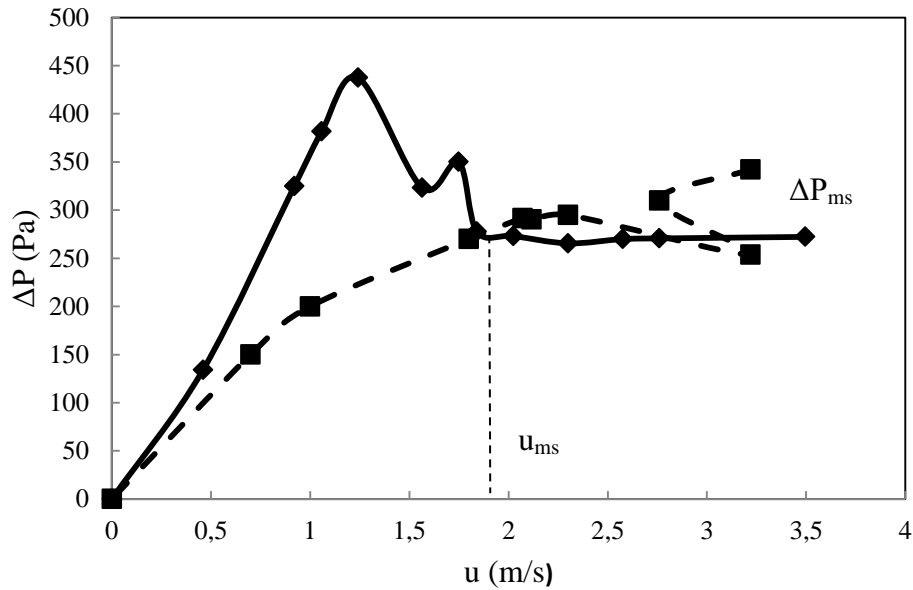


Figura 4.5. Evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire. Contactor: $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,04$ m, lecho de mijo de $d_p=2,22$ mm y $H_0=0,08$ m.

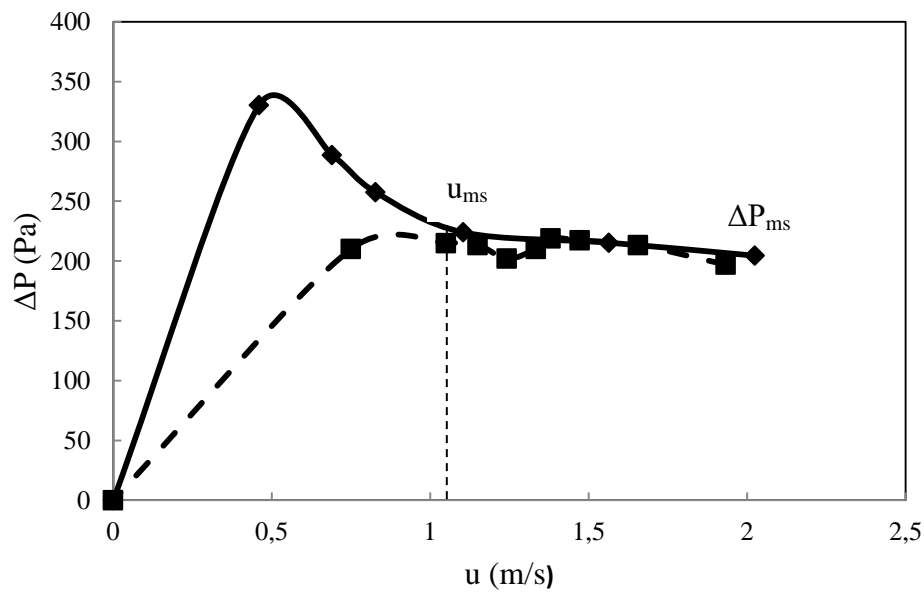


Figura 4.6. Evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire. Contactor: $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,04$ m, lecho de quínoa de $d_p=1,78$ mm y $H_0=0,08$ m.

Las Figuras 4.7 y 4.8, muestran la evolución de la pérdida de carga con el aumento de la velocidad del aire, utilizando el diámetro de entrada al contactor, D_0 , de 0,03 m.

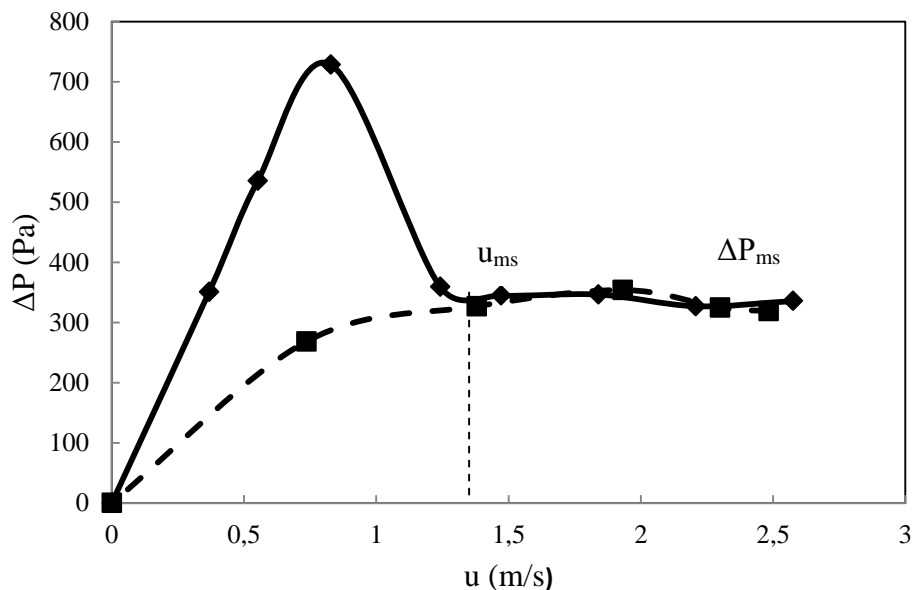


Figura 4.7. Evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire. Contactor: $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,03$ m, lecho de mijo de $d_p=2,22$ mm y $H_0=0,08$ m.

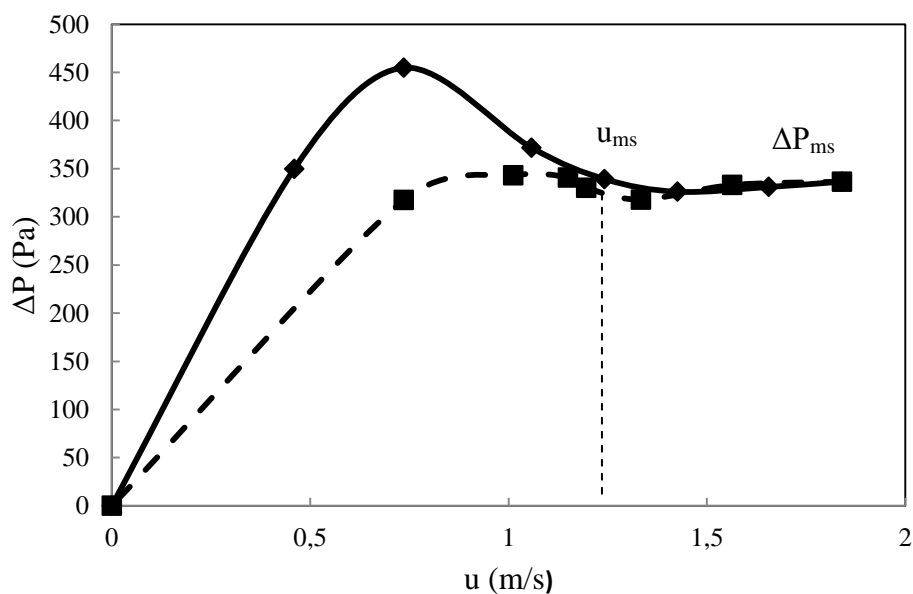


Figura 4.8. Evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire. Contactor: $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,03$ m, lecho de quínoa de $d_p=1,78$ mm y $H_0=0,08$ m.

En este caso, los lechos son estables y las curvas presentan una tendencia similar a las comentadas anteriormente.

Se ha de mencionar, que la disminución de las relaciones D_0/d_p y D_0/D_i , que son factores de diseño, han influenciado positivamente en los lechos de partículas uniformes de mijo y quínoa. Además, una disminución en el diámetro de entrada del aire, D_0 , permite alcanzar valores de pérdida de carga estable, ΔP_{ms} , de pérdida de carga máxima, ΔP_{ms} , y velocidad mínima de spouting, u_{ms} , mayores.

Se ha realizado el estudio fluidodinámico de mezclas binarias. A modo de ejemplo, se presenta la Figura 4.9, que corresponde a la evolución de ΔP vs. u del lecho de una mezcla binaria de garbanzos y arroz al 50 % en peso de cada material granular, en una altura del lecho estancado de 0,14 m, en un contactor de $D_0=0,04$ m.

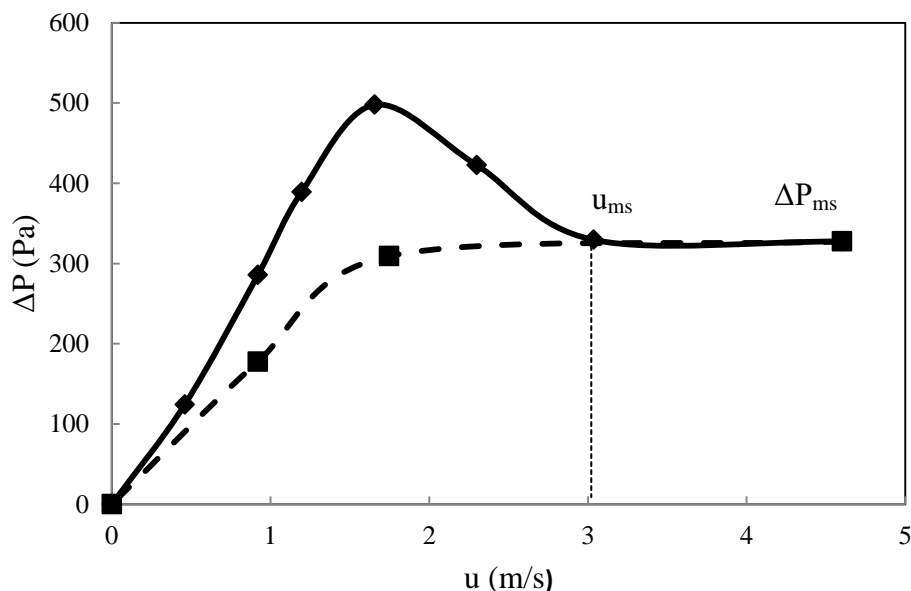


Figura 4.9. Evolución de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire. Contactor: $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,03$ m, lecho binario de garbanzos-arroz (al 50 % en peso) de $d_p=11,32$ mm y $d_p=3$ mm y $H_0=0,08$ m.

La curva experimental de ΔP vs. u de la mezcla binaria, garbanzos-arroz, presenta valores intermedios de pérdida de carga en comparación con los valores de pérdida de carga de los lechos uniformes de garbanzos y con los lechos de arroz. Además, cuando la velocidad del aire decrece en mezclas binarias, aparece un pequeño máximo, histéresis que puede ser característica de las mezclas. Cabe destacar, que los valores experimentales de la pérdida de carga respecto de la velocidad del aire de lechos binarios, son más próximos a los valores experimentales obtenidos con los lechos uniformes del diámetro de partícula menor de la mezcla.

Hay que decir que cuando los lechos con partículas uniformes son estables, la mezcla de los dos tamaños también es estable y que cuando los lechos de partículas uniformes son inestables, su mezcla normalmente genera estabilidad.

Los valores experimentales de u_{ms} y ΔP_{ms} se han ajustado a las correlaciones propuestas para estas variables en trabajos anteriores, observando que los ajustes presentan un coeficiente de regresión, r^2 , superior en todos los casos estudiados a 0,90 y un error máximo inferior al 10%. A continuación, se muestra a modo de ejemplo las Figuras 4.10 y 4.11, donde se comparan los valores experimentales de la velocidad mínima de spouting y pérdida de carga estable en lechos uniformes de arroz, con la velocidad mínima de spouting, calculada mediante la ecuación (2.1) y la pérdida de carga estable, calculada mediante la ecuación (2.3).

La obtención de los valores experimentales de pérdida de carga máxima, ΔP_m , de los lechos resulta más difícil. Sin embargo, comparando los valores experimentales con los calculados con la ecuación (2.2) el error relativo máximo de ΔP_m es inferior al 15%.

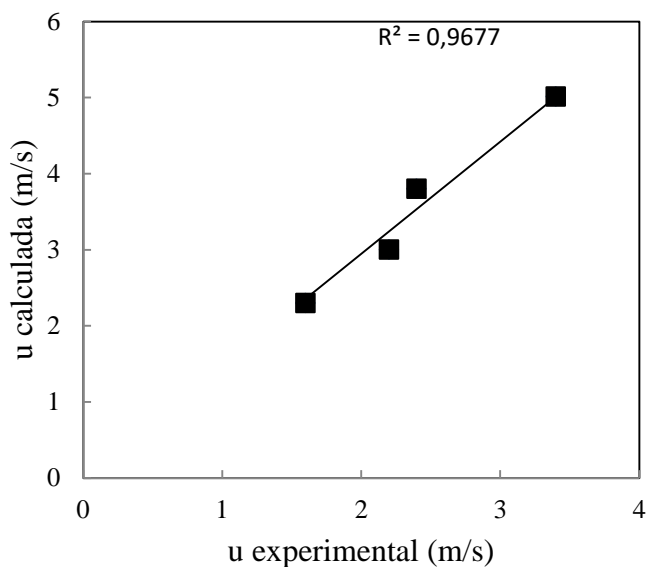


Figura 4.10. Comparación de los valores experimentales de la velocidad mínima de spouting con los valores calculados usando la ecuación (2.1). $\gamma=36^\circ$; $D_0=0,04$ m.

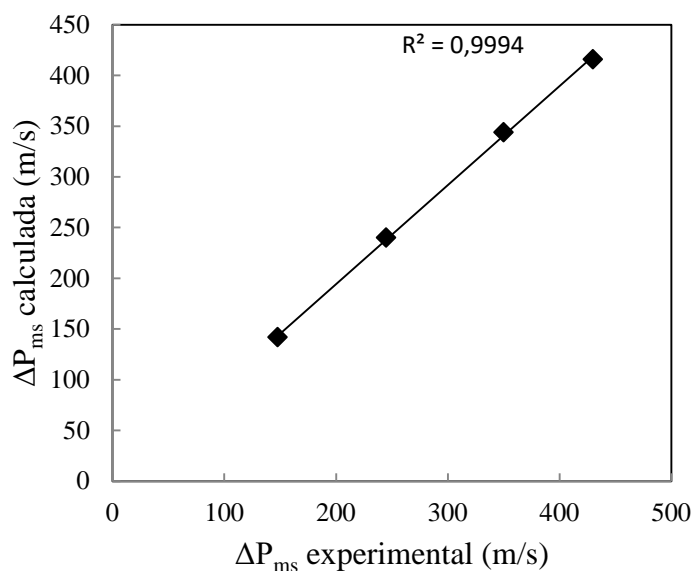


Figura 4.11. Comparación de los valores experimentales de la pérdida de carga estable con los valores calculados usando la ecuación (2.3). $\gamma=36^\circ$; $D_0=0,04$ m.

4.2. MAPAS DE OPERACIÓN

Para conocer de una manera fácil las condiciones de operación, se utilizan unos gráficos que muestran la altura del lecho estancado, H_0 , frente a la velocidad del aire. Como ejemplo de los resultados experimentales, se muestran cuatro mapas de operación correspondientes a lechos uniformes y lecho de mezcla binaria.

Las Figuras 4.12-4.14 corresponden a las velocidades mínimas de spouting de lechos de partículas uniformes de arroz, garbanzos y maíz, con diámetros de partículas, d_p , de 3 mm, 11,32 mm y 7,19 mm, para diferentes alturas del lecho estancado en un contactor cónico, con un diámetro de entrada de 0,04 m y un ángulo de 36° .

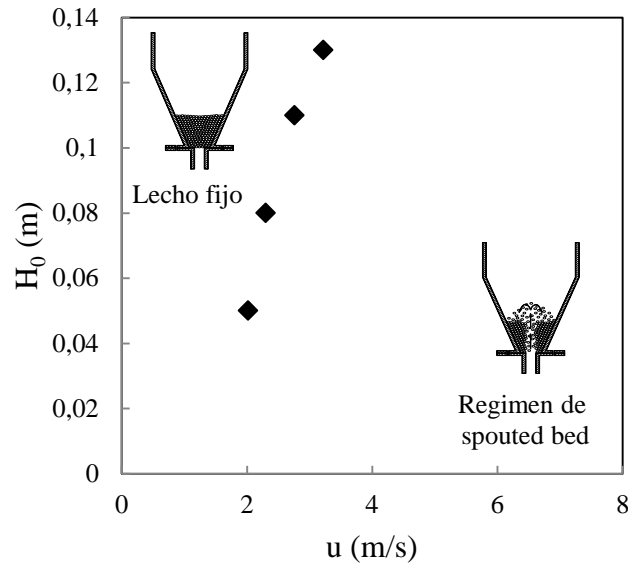


Figura 4.12. Mapa de operatividad. Altura del lecho estancado, H_0 , frente a la velocidad para una geometría del contactor, $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,04$ m. Lecho de arroz de $d_p=3$ mm.

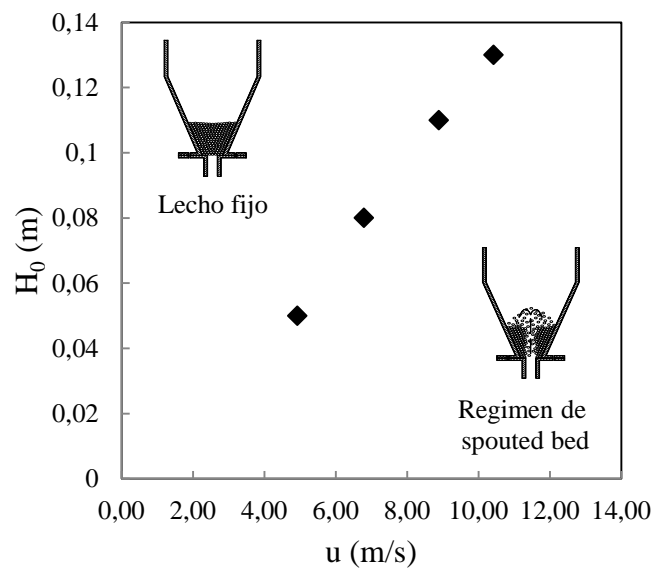


Figura 4.13. Mapa de operatividad. Altura del lecho estancado, H_0 , frente a la velocidad para una geometría del contactor, $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,04$ m. Lecho de garbanzos de $d_p=11,32$ mm.

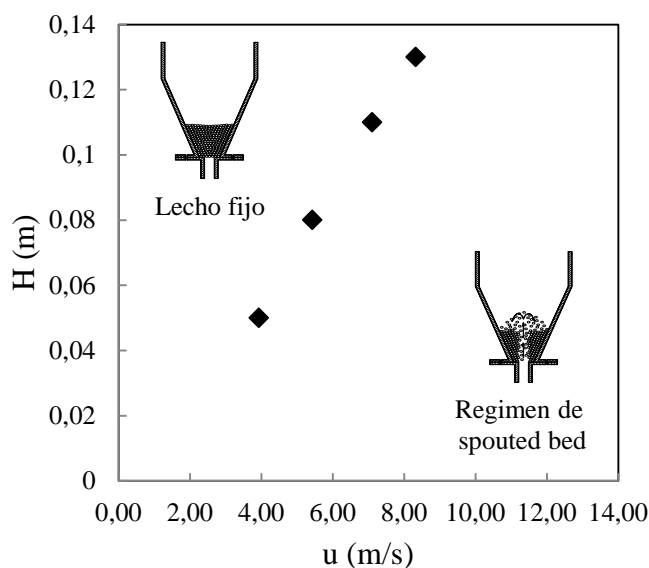


Figura 4.14. Mapa de operatividad. Altura del lecho estancado, H_0 , frente a la velocidad para una geometría del contactor, $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,04$ m. Lecho de maíces de $d_p=7,19$ mm.

Los valores experimentales corresponden a las velocidades mínimas de spouting para cada altura del lecho estancado. Se observa que a la izquierda de estos puntos experimentales el lecho es fijo, sin movimiento, mientras que a la derecha, es decir, a mayores velocidades que la mínima de spouting correspondiente a cada altura del lecho estancado, el régimen obtenido es el régimen de spouted bed.

Como se observa en las Figuras 4.12-4.14, un aumento en el diámetro de partícula, d_p , implica una mayor velocidad mínima de spouting, u_{ms} , para la misma altura del lecho estancado.

En la Figura 4.15, se han representado los resultados experimentales de condiciones de operación estable de lechos binarios de arroz y garbanzos. El diámetro de Sauter, \bar{d}_s , representativo de esta mezcla se ha indicado en la Tabla 3.2. del apartado experimental.

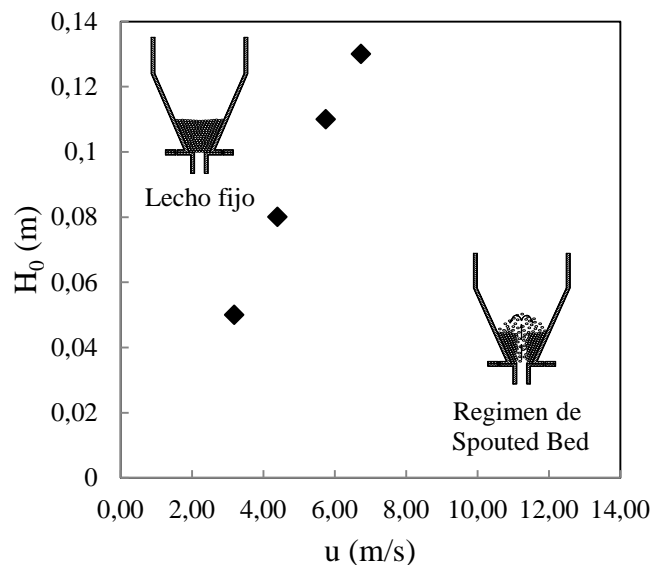


Figura 4.15. Mapa de operatividad. Altura del lecho estancado, H_0 , frente a la velocidad para una geometría del contactor, $\gamma=36^\circ$, $D_0=0,04$ m. Lecho de garbanzos y arroz de $d_s=4,74$ mm.

Tal y como se observa en los gráficos 4.12-4.15, la velocidad mínima de spouting aumenta proporcionalmente al aumentar la altura del lecho estancado. De manera que existe un amplio rango de velocidades de operación estable con los lechos uniformes de arroz, garbanzos y maíz y lecho binario de arroz-garbanzos.

4.3. SEGREGACIÓN

Se ha estudiado la segregación de diferentes mezclas binarias, tanto con una proporción del 50% en peso de cada sólido, como con mezclas del 80-20% y 20-80% en peso. Las mezclas utilizadas han sido garbanzos-arroz, garbanzos-maíz, arroz-maíz y mijo-quínoa.

En la Figura 4.16 se muestran los resultados experimentales de la fracción en peso de las partículas más grandes de la mezcla, $(\bar{X}_B)_h$, en diferentes alturas del lecho, h . La mezcla binaria corresponde a un lecho de $H_0=0,14$ m de garbanzos y arroz al 50% en peso de cada material granular (de densidades similares).

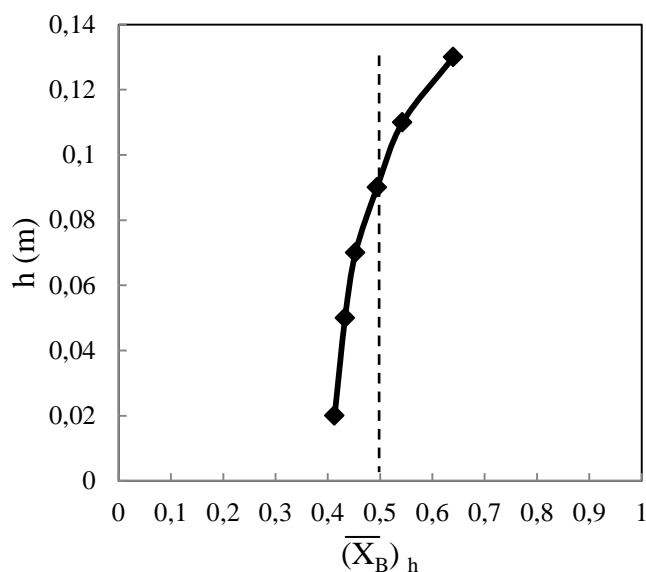


Figura 4.16. Valores de la fracción media en peso de las partículas más grandes, $(\bar{X}_B)_h$, en diferentes alturas, h . Sistema: mezcla binaria 1 (al 50% en peso, $d_B=11,32$ mm, $d_S=3$ mm), $H_0=0,14$ m; $D_0=0,04$ m.

Como se observa en la Figura 4.16, los sólidos de mayor tamaño (garbanzos) están en una mayor proporción en la parte superior del lecho, mientras que en la parte inferior, hay mayor cantidad de los granos pequeños (arroz). Este hecho se explica fundamentalmente, porque las partículas de menor tamaño, arroz, presentan trayectorias más largas y externas, más cerca de la pared del contactor, mientras que las partículas más gruesas, garbanzos, presentan trayectorias más cortas y más cercanas a la zona central del contactor. De esta manera, los granos de garbanzos cuando caen a la zona de spout, de nuevo tienden a seguir posiciones radiales cerca de la zona spout-anular, y por eso, describen trayectorias menores que los granos pequeños.

La Figura 4.17, tomada como ejemplo, corresponde a valores puntuales de los porcentajes en peso de las partículas de mayor tamaño, en diferentes posiciones radiales y longitudinales del lecho de la Figura 4.16, mezcla binaria 1.

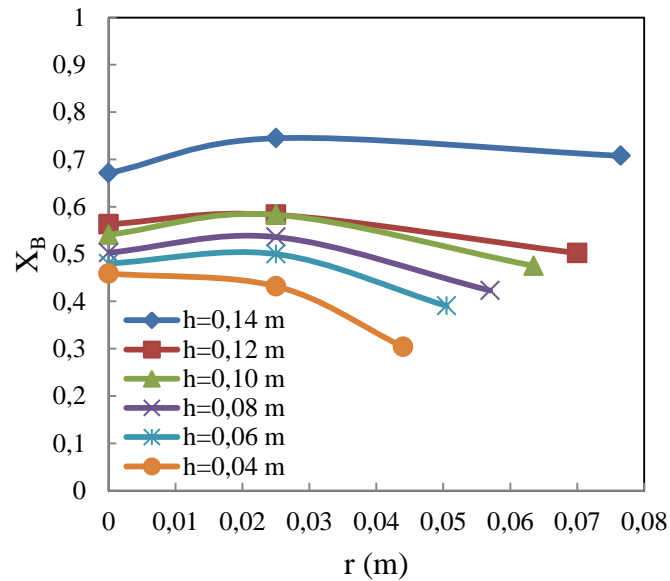


Figura 4.17. Fracción en peso de las partículas de mayor tamaño, X_B , para diferentes posiciones longitudinales y radiales del lecho. Sistema: mezcla binaria 1 (al 50% en peso, $d_B = 11,32$ mm, $d_S = 3$ mm), $H_0 = 0,14$ m; $D_0 = 0,04$ m.

Estas curvas, para cada altura del lecho, en general, presentan un valor menor de X_B en la zona central con un ligero máximo en una posición intermedia. Si bien, para alturas bajas estas curvas disminuyen desde el valor que presentan en la zona central hasta la zona de la pared.

La Figura 4.18 muestra la fracción en peso de las partículas más grandes, X_B , en diferentes alturas del lecho, h , de una mezcla binaria correspondiente a maíz y arroz al 50% en peso de cada material granular, siendo el maíz de mayor tamaño y densidad parecida (algo mayor). La relación de tamaños de partícula maíz-arroz, $\frac{d_{pB}}{d_{pS}} = \frac{7,19}{3}$ y la relación de densidades maíz-arroz

$$\text{es } \frac{\rho_B}{\rho_S} = \frac{1290}{1250}.$$

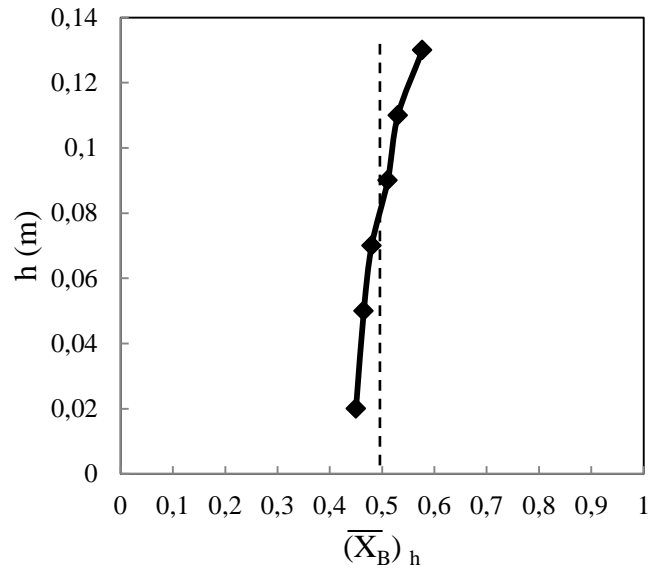


Figura 4.18. Valores de la fracción media en peso de las partículas más grandes, $(\bar{X}_B)_h$ en diferentes alturas, h . Sistema: mezcla binaria 2 (al 50% en peso, $d_B=7,19$ mm, $d_S=3$ mm), $H_0=0,14$ m; $D_0=0,04$ m.

De la observación de la Figura 4.18, se muestra que hay una mayor cantidad de las partículas más grandes, maíz, en la parte superior del lecho, mientras que en la parte inferior, se encuentra mayor cantidad de las pequeñas, arroz, siendo el maíz y el arroz de densidades similares.

La Figura 4.19 muestra la fracción en peso de las partículas más grandes en diferentes alturas en el lecho. Se trata de una mezcla binaria de mijo y quínoa, las cuales tiene un diámetro de partícula y densidad similar.

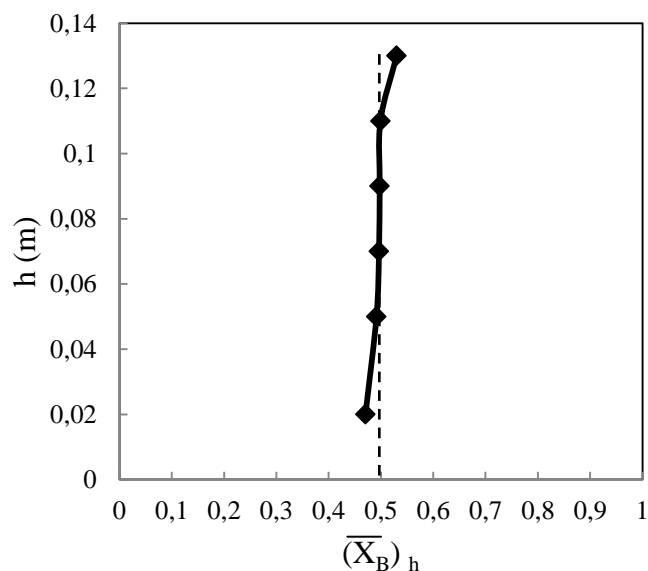


Figura 4.19. Valores de la fracción media en peso de las partículas más grandes, $(\bar{X}_B)_h$ en diferentes alturas, h . Sistema: mezcla binaria 3 (al 50% en peso, $d_B= 2,22$ mm, $d_S=1,78$ mm), $H_0=0,14$ m; $D_0=0,04$ m.

En la Figura 4.19, se obtienen conclusiones similares que en las anteriores mezclas binarias, ya que en la parte superior del lecho se encuentran en mayor cantidad las partículas de mayor tamaño, pero en la parte inferior del lecho las partículas de menor tamaño. En comparación con las mezclas binarias comentadas anteriormente, casi no se aprecia segregación, es decir, en la mayoría de las alturas del lecho, las proporciones obtenidas de cada material granular rondan el 50% en peso.

La Figura 4.20, corresponde a valores puntuales de los porcentajes en peso de las partículas de mayor tamaño, en diferentes posiciones radiales y longitudinales de la mezcla binaria de la Figura 4.19, mezcla 3.

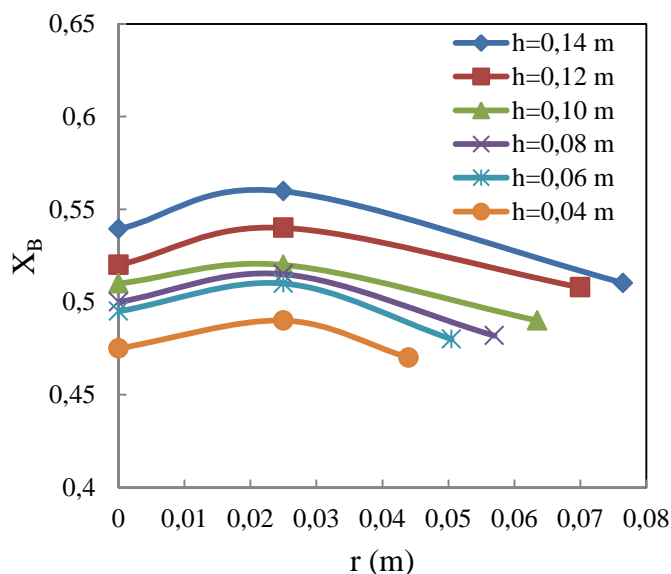


Figura 4.20. Fracción en peso de las partículas de mayor tamaño, X_B , para diferentes posiciones longitudinales y radiales del lecho. Sistema: mezcla binaria 3 (al 50%, $d_B=4,17$ mm, $d_S=2,94$ mm), $H_0=0,14$ m; $D_0=0,04$ m.

Al trabajar a la velocidad mínima de spouting, la mezcla binaria es estable y en este caso, se observa la misma tendencia que en la mezcla de la Figura 4.17.

Por último, se han estudiado mezclas binarias de garbanzos y maíz, en diferentes proporciones de los distintos granos, para determinar la influencia de la proporción de la mezcla. Las mezclas binarias estudiadas han sido garbanzos-maíz al 50% en peso de cada una de las partículas sólidas, al 80-20% en peso y al 20-80% en peso. Estas mezclas se caracterizan por presentar los granos de garbanzos mayor tamaño, mayor densidad y mayor masa que los granos de maíz. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 4.21-4.23.

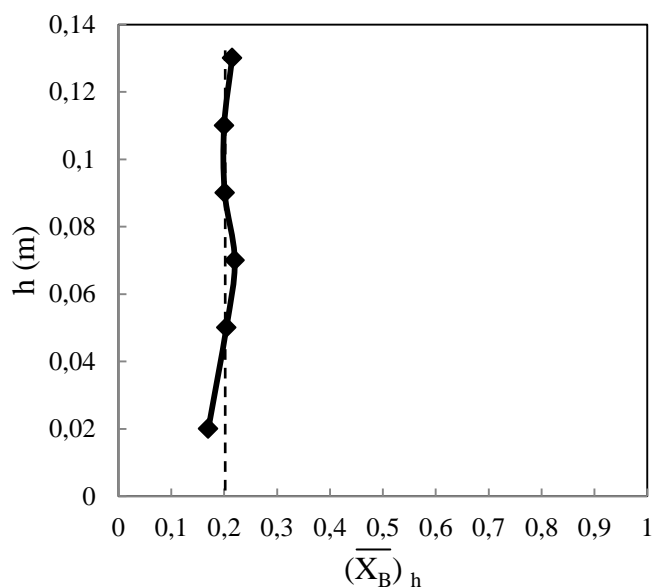


Figura 4.21. Valores de la fracción media en peso de las partículas más grandes, $(\bar{X}_B)_h$ en diferentes alturas, h . Sistema: mezcla binaria 4 (al 20-80% en peso, $d_B=11,32$ mm, $d_S=7,19$ mm), $H_0=0,14$ m; $D_0=0,04$ m.

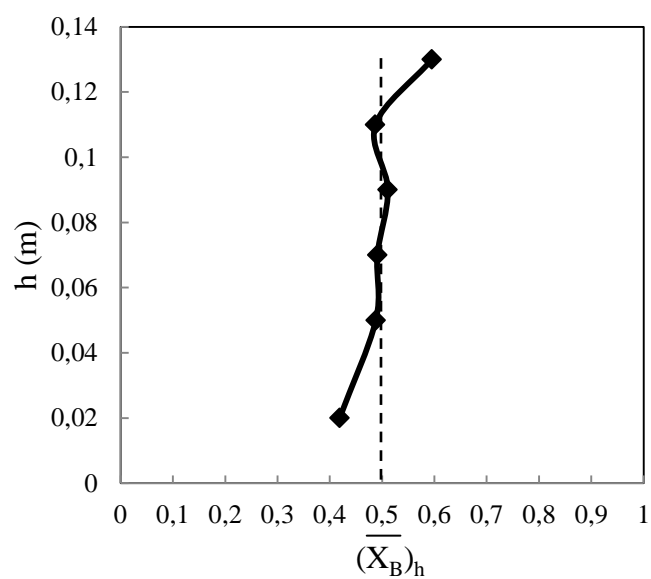


Figura 4.22. Valores de la fracción media en peso de las partículas más grandes, $(\bar{X}_B)_h$, en diferentes alturas, h . Sistema: mezcla binaria 5 (al 50% en peso, $d_B=11,32$ mm, $d_S=7,19$ mm), $H_0=0,14$ m; $D_0=0,04$ m.

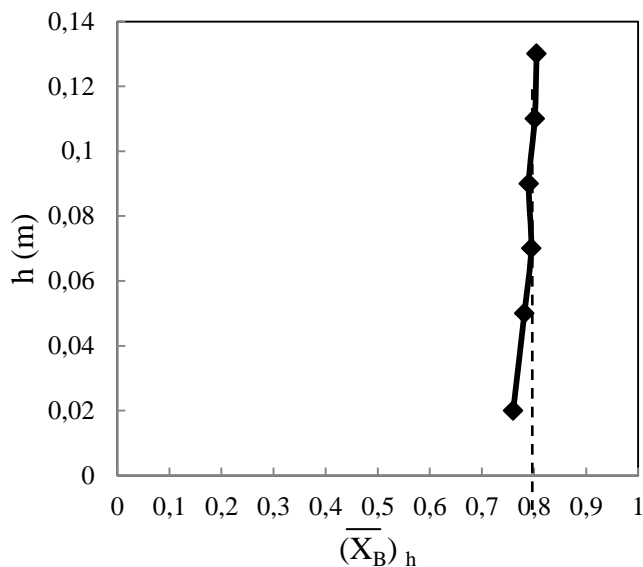


Figura 4.23. Valores de la fracción media en peso de las partículas más grandes, $(\bar{X}_B)_h$ en diferentes alturas, h . Sistema: mezcla binaria 6 (al 80-20% en peso, $d_B=11,32$ mm, $d_S=7,19$ mm), $H_0=0,14$ m; $D_0=0,04$ m.

Comparando las gráficas de las Figuras 4.21-4.23, destaca que con relaciones de proporciones de partículas de mayor tamaño (garbanzos) respecto de menor tamaño (maíz), igual a 1, la segregación es más pronunciada. Asimismo, cuando la relación de proporción de partículas grandes a partículas pequeñas es más pequeña, menor que 1, la segregación es menor. Se han calculado los índices de mezcla de las mezclas 4, 5 y 6. Los valores obtenidos han sido 1,02 para la mezcla 4 al 20%-80% en peso, 1,09 para la mezcla 5 al 50% en peso, y 1,05 para la mezcla 6 al 80%-20% en peso.

Por lo tanto, si la relación de proporción de partículas más grandes a la de partículas pequeñas es igual a 1, $\frac{X_B}{X_S}=1$, la segregación es mayor, que si la relación de proporción de partículas más grandes a la de partículas más pequeñas es mayor que 1, $\frac{X_B}{X_S}>1$ o si la relación es menor que 1, $\frac{X_B}{X_S}<1$. Es decir, las partículas gruesas con un diámetro de partícula, d_p , y una densidad mayor, se encuentra en mayor proporción en la parte superior del lecho, cuando la mezcla es del 50% en peso.

Se ha representado el índice de mezcla calculado con la ecuación (2.14) respecto de la composición de la mezcla en la Figura 4.24, para una mejor visualización del efecto de la misma, para las mezclas 4,5 y 6 correspondientes a lechos de garbanzos y maíz.

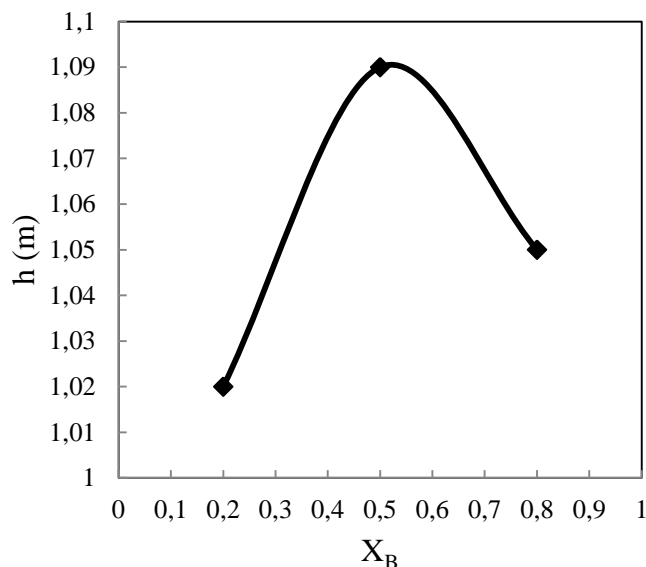


Figura 4.24. Fracción en peso de las partículas más grandes, X_B , en diferentes alturas del lecho, h .

En la Figura 4.24 se puede observar el máximo del índice de mezcla para proporciones iguales de los diferentes tamaños de partícula del lecho.

La Tabla 4.1 muestra los resultados de los valores calculados del índice de mezcla de cada estudio realizado, para así poder cuantificar la segregación, calculada con la ecuación (2.14), para una mejor visualización.

Tabla 4.1. Valores del índice de mezcla calculados con la ecuación (2.14) de las mezclas binarias estudiadas.

| Número de mezcla | Proporciones | Índice de mezcla, M |
|------------------|--------------|---------------------|
| 1 | 50%-50% | 1,15 |
| 2 | 50%-50% | 1,11 |
| 3 | 50%-50% | 1,01 |
| 4 | 20%-80% | 1,02 |
| 5 | 50%-50% | 1,09 |
| 6 | 80%-20% | 1,05 |

Como conclusión se puede decir, que en general, los índices de mezcla son muy bajos en todas la mezclas estudiadas, si bien se presenta algo de segregación, siendo superior para las mezclas al 50% en peso.

5. CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos:

- Estudio fluidodinámico

1. En el estudio fluidodinámico realizado, se ha obtenido experimentalmente, que para lechos uniformes de los diferentes materiales granulares, en diferentes alturas del lecho estancado, se obtiene una mayor pérdida de carga estable, ΔP_{ms} , mayor pérdida de carga máxima, ΔP_m , y una mayor velocidad mínima de spouting, u_{ms} , en alturas de lecho estancado más altas. Por otro lado, con un aumento en el diámetro de partícula, d_p , y en la densidad de los sólidos, ρ_s , se obtienen mayores valores de pérdida de carga estable, pérdida de carga máxima y velocidad mínima de spouting.

Para mezclas binarias, se han obtenido las mismas conclusiones, considerando el diámetro de Sauter, \bar{d}_s , el diámetro representativo de las mismas.

- Mapas de operación estable

2. En cuanto al estudio de operatividad en régimen estable de spouted bed, que permite obtener información sobre el diseño del contactor, se concluye que, en general, existe un amplio rango de velocidades, en los que se puede trabajar en régimen de spouted bed con la entrada al contactor de 0,04 m.

3. En el caso de lechos uniformes de partículas pequeñas, se observa que, utilizando un diámetro de entrada del aire al contactor, D_0 , de 0,04 m, todos los lechos son inestables. Sin embargo, utilizando el diámetro de entrada del aire, D_0 , de 0,03 m los lechos son estables, obteniéndose un amplio rango de velocidades de operación estable.

- Segregación

4. En cuanto a los resultados de segregación de mezclas binarias de granos de biomasa, se ha obtenido que en general, en la parte superior del lecho se encuentra una mayor cantidad de las partículas más grandes, mientras que en la parte inferior del lecho, se encuentran en mayor cantidad las partículas más pequeñas de la mezcla binaria.

5. Los factores que influyen en la segregación son el diámetro de partícula, d_p , y la densidad, ρ_s , de cada material granular, por lo que en lechos binarios, el material granular con valores mayores de estos factores, se encontrará en mayor proporción en la parte superior del lecho que en la parte inferior del mismo.

6. La segregación es mayor en mezclas binarias al 50% en peso de cada material sólido, siendo menor la segregación para las mezclas de composiciones 80-20% y 20%-80% en peso de cada material.

Si la relación de partículas grandes a partículas pequeñas es igual a 1, se aprecia una mayor segregación, que si la relación de partículas grandes a partículas pequeñas es mayor o es menor que 1.

Por lo tanto, si $\frac{X_B}{X_S}=1$, la segregación es mayor que si $\frac{X_B}{X_S}>1$ o $\frac{X_B}{X_S}<1$.

7. En cuanto a los resultados experimentales de la fracción en peso de las partículas de mayor tamaño en las diferentes posiciones longitudinales y radiales del lecho, las tendencias son similares, presentando un valor menor del porcentaje de partículas más grandes del lecho, X_b , en la zona central del contactor con un ligero máximo en la zona anular del lecho.
8. Los lechos de mezclas binarias de los sólidos granulares estudiados, presentan en general, una buena mezcla en el spouted bed de geometría cónica, obteniéndose índices de mezcla cercanos a 1.

6. NOMENCLATURA

| | |
|----------------------|---|
| A_f | anchura de la fuente, m |
| Ar | número de Arquímedes, $gd_p^3 \rho (\rho_s - \rho) / \mu^2$, - |
| C_D | coeficiente de arrastre, - |
| D_b | diámetro de la parte superior del lecho, m |
| D_c | diámetro superior del contactor, m |
| D_i | diámetro de la base del contactor, m |
| D_0 | diámetro de la entrada del aire al contactor, m |
| D_0^* | relación entre el diámetro de entrada del aire y diámetro de la base del contactor, - |
| $\overline{D_S}$ | diámetro medio del spout, m |
| d_B | diámetro de partícula de la partícula de mayor tamaño, m |
| d_p | diámetro de partícula, m |
| d_p^* | modulo del tamaño y densidad de las partículas, - |
| d_R | relación de los diámetros de las partículas de los sólidos de la mezcla, - |
| d_S | diámetro de partícula de la partícula de menor tamaño, m |
| $\overline{d_s}$ | diámetro medio de Sauter, $1 / \sum (x_i / d_{pi})$, m |
| F_D / F_G | relación entre la fuerza de resistencia y gravitacional, - |
| g | gravedad, $m s^{-2}$ |
| h | altura del lecho, m |
| H_c | altura de la sección cónica, m |
| H_0 | altura del lecho estancado, m |
| H_f | altura de la fuente, m |
| $(H_0)_m$ | altura mínima del lecho estancado, m |
| H_0^* | relación entre la altura del lecho estancado y la altura de la sección cónica, - |
| M | índice de mezcla, - |
| ΔP_m | pérdida de carga máxima, Pa |
| ΔP_{ms} | pérdida de carga estable, Pa |
| Q | caudal de aire, m^3/h |
| Re | número de Reynolds referido a D_b , - |
| $(Re_0)_{ms}$ | número de Reynolds correspondiente al mínimo de spouting referido a D_0 , - |
| r | posición radial, m |
| u | velocidad del aire referido a D_i , $m s^{-1}$ |
| u_{ms} | velocidad mínima de spouting referida a D_i , $m s^{-1}$ |
| u_R | relación entre la velocidad del aire y la velocidad mínima de spouting, $m s^{-1}$ |
| u^* | módulo de velocidad, - |
| X_B | fracción en peso de las partículas de mayor tamaño en cualquier punto del lecho, - |
| $\overline{X_B}$ | fracción en peso de las partículas de mayor tamaño en el lecho, - |
| $(\overline{X_B})_h$ | fracción media en peso de las partículas de mayor tamaño en la altura h y en la mitad superior del volumen del lecho, - |

Letras griegas

| | |
|-----------------|----------------------------------|
| ϵ | porosidad del lecho, - |
| ϵ_{ms} | porosidad mínima de spouting, - |
| ϵ_0 | porosidad del lecho estancado, - |
| γ | Angulo del cono, radianes |
| μ | viscosidad, $kg m^{-1} s^{-1}$ |

| | |
|------------------------|---|
| ρ, ρ_s, ρ_b | densidad del gas, densidad de la partícula sólida y densidad del lecho, kg m^{-3} |
| Ψ, Ψ_s | función de la ecuación (2.8) y expresiones particulares de la misma, definida en la ecuación (2.9), - |
| ϕ | esfericidad,- |

7. BIBLIOGRAFÍA

Aguado, R., 1999. Combustión y pirólisis de residuos de madera en spouted bed cónico, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, Bilbao.

Amutio, M., 2011. Estrategias para la pirolisis rápida de biomasa en reactor de spouted bed cónico, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, Bilbao.

Amutio, M., Lopez, G., Artetxe, M., Elordi, G., Olazar, M. and Bilbao, J., 2012. Influence of temperature on biomass pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Resour. Conserv. Recy.*, 59, 23-21.

Camia, A., Robert, N., Jonsson, R., Pilli, R., García-Condad, S., López-Lozano, R., van der Velde, M., Ronzon, T., Gurría, P., M'Barek, R., Tamosiunas, S., Fiore, G., Araujo, R., Hoepffner, N., Marelli, L., Giuntoli, J., 2018. Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. First results from an integrated assessment, EUR 28993 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN:978-92-79-77237, doi:10.2760/539520, JRC109869.

de Lucas, A., del Peso, 2012. Materias primas, en: Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad, Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario, Palencia, ISBN: 978-84-931891-5-0

Erkiaga, A., 2014. Gasificación con Vapor de Biomasa y Plásticos en Spouted Bed cónico, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, Bilbao.

Epstein, N., Grace, J.R., 2011. Spouted and spout-fluid beds: Fundamentals and applications., CUP, Cambridge, pp 1-3.

Geldart, D., 1973. Types of gas fluidization. *Powder Technol.* 7 (5), 285-292.

Geldart, D., 1986. *Gas Fluidization Technology*, John Wiley, Nueva York.

Gishler, P.E., Mathur, K.B., 1957a. Patente nº 2786280, USA.

Gishler, P.E., Mathur, K.B., 1957b. Patente nº 801315, G.B.

Grace, J.R., 1986. Contacting modes and behaviour classification of gas-solid and other two-phase suspensions. *Can. J. Chem. Eng.* 64 (3), 353-363.

Hao, H., Guoxin, H., Fengchao, W., 2008. Experimental study on particles mixing in an annular spouted bed. *Energ. Convers. Manage.* 49 (2), 257-266.

Kiani, M., Rahimi, M.R., Hosseini, S.H., Ahmadi, G., 2017. Mixing and segregation of solid particles in a conical spouted bed: Effect of particle size and density. *Particuology.* 32, 132-140.

Leva, M., 1959. *Fluidization*, Mc Graw-Hill, Nueva York.

Mathur, K.B., Gishler, P.E., 1955a. A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying. *J. Appl. Chem.* 5 (11), 624-636.

Mathur, K.B, Gishler, P.E., 1955b. A technique for contacting gases with coarse solid particles. *AIChE J.* 1 (2), 157-164.

Mathur, K.B., Epstein, N., 1974. *Spouted beds*, Acad. Pr., New York.

Olazar, M., San José, M.J., Aguayo, A.T., Arandes, J.M., (1992). Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. *Ind. Eng. Chem. Res.* 31 (7), 1784-1792.

Olazar, M., San José, M.J., Aguayo, A.T., Arandes, J.M., (1993a). Pressure Drop in Conical Spouted Beds. *Chem. Eng. J.* 51 (1), 53-60.

Olazar, M., San José, M.J., Aguayo, A.T., Arandes, J.M., (1993b). Design Factors of Conical Spouted Beds and Jet Spouted Beds. *Ind. Eng. Chem. Res.* 32 (6), 1245-1250.

Olazar, M., San José, M.J., Peñas, F.J., Aguayo, A.T., Bilbao, J., (1993c). Stability and Hydrodynamics of Conical Spouted Beds with Binary Mixtures. *Ind. Eng. Chem. Res.* 21 (11), 2826-2834.

Olazar, M., Alvarez, S., Aguado, R., San José, M.J., 2003. Spouted bed reactors. *Chem. Eng. Technol.* 26 (8), 845-852.

Olazar, M., San José, M.J., Bilbao, J., 2011. Conical Spouted Beds, en: Epstein, N., Grace, J.R., (Eds). *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamental and applications*, CUP, Cambridge, pp 82-100.

Ren, B., Shao, Y., Zhong, W., Yuan, Z., Lu, Y., 2012. Investigation of mixing behaviors in a spouted bed with different density particles using discrete element method. *Powder Technol.* 222, 85-94.

Romero, A., 2010. Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat.* 104 (2), 331-345.

San José, M.J., 1991. Regímenes de operación en “spouted beds” cónicos y condiciones de estabilidad y fluidodinámica, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, Bilbao.

San José, M.J., Olazar, M., Aguayo, A.T., Arandes, J.M., Bilbao, J., 1993. Expansion of Spouted Beds in Conical Contactors. *Chem. Eng. J.* 51 (1), 45-52.

San José, M.J., Olazar, M., Peñas, F.J., Bilbao, J., 1994. Segregation in Conical Spouted Beds with Binary and Ternary Mixtures of equidensity Spherical Particles. *Ind. Eng. Chem. Res.* 33 (7), 1838-1844.

San José, M. J., Olazar, M., Álvarez, S., Morales, A., Bilbao, J., (2005). Spout and Fountain Geometry in Conical Spouted Beds Consisting of Solids of Varying Density. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44(1), 193–200.

Wang, X., Jin, B., Wang, Y., Hu, C., 2015. Three-dimensional multi-phase simulation of the mixing and segregation of binary particle mixtures in a two-jet spout fluidized bed. *Particuology*, 22, 185-193.

Zabrodsky, S.S., 1966. Hydrodynamics and Heat transfer in fluidized beds, MIT Pr., Cambridge, Massachusetts.