

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Estudio de la fluctuación de presión en Spouted bed cónico provisto de dispositivos estabilizadores

Egilea/Autor:
Jon Leivar Cilleruelo
Zuzendaria/Director:
Haritz Altzibar

© 2020, Jon Leivar Cilleruelo

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	
1.1. ORIGEN DEL SPOUTED BED	1
1.2. CARACTERÍSTICAS DEL SPOUTED BED.....	1
1.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SPOUTED BEDS FRENTE A LOS LECHOS CONVENCIONALES	3
1.4. APLICACIONES DEL SPOUTED BED	5
1.5. EL SPOUTED BED CÓNICO.....	5
1.6. DISPOSITIVOS INTERNOS DEL SPOUTED BED	6
1.6.1. Tubos centrales internos.....	6
1.6.2. Confinador de la fuente	7
1.7. HIDRODINÁMICA DE LOS SPOUTED BEDS.....	8
1.7.1. Clasificación de las partículas	8
1.7.2. Curvas características	9
a. Partículas gruesas	10
b. Partículas finas	11
1.8. FLUCTUACIONES DE PRESIÓN	14
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	16
3. EXPERIMENTAL	17
3.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	17
3.1.1. Calibrado de los dispositivos.....	19
3.2. CONDICIONES EXPERIMENTALES	21
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	25
4.1. SEÑALES DE LA PRESIÓN DIFERENCIAL.....	25
4.2. OBTENCIÓN DE LA FRECUENCIA PREDOMINANTE	26
4.2.1. Partículas finas	27
4.2.2. Partículas gruesas	28
4.3. EFECTO DE LA CONFIGURACIÓN	29
4.4. EFECTO DEL SÓLIDO	32
4.5. EFECTOS DE DIFERENTES PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	34
4.5.1. Efecto del ángulo del contactor cónico	34
4.5.2. Efecto del diámetro de entrada del aire	36
4.5.3. Efecto de la altura del lecho	38

5. CONCLUSIONES.....	40
6. NOMENCLATURA	42
7. BIBLIOGRAFÍA	44

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ORIGEN DEL SPOUTED BED

La fluidización está presente en gran parte de las industrias químicas en multitud de procesos, es por ello por lo que se ha invertido de forma manifiesta en el desarrollo de esta tecnología a lo largo de las últimas décadas. En 1955 Marthur y Epstein desarrollaron el spouted bed, el cual es un método de contacto gas-sólido en el que las partículas son arrastradas por un flujo de gas a través de un pequeño orificio en el centro de la base de una columna. Este sistema proporciona un gran contacto gas-sólido (para tiempos de residencia cortos del gas) y sobre todo para partículas grandes y densas para las cuales la fluidización convencional no es posible o es difícil de lograr (Epstein y Grace, 2010).

El spouted bed fue concebido originalmente como una versión modificada de un lecho fluidizado (Mathur y Epstein, 1974). La necesidad de modificación derivada de la inadecuada fluidización con partículas uniformemente gruesas caracterizó al spouted bed como un tipo especial de lecho fluidizado. Sin embargo, la clasificación dada resultó inadecuada debido a que en las últimas décadas se ha demostrado que el spouted bed muestra características especiales. Así, el spouted bed realiza ciertas operaciones cíclicas útiles sobre partículas sólidas que no pueden realizarse en un lecho fluidizado, ya que este último presenta un movimiento de partículas aleatorio y caótico. Es por ello, que en un futuro podría ser sustituto del lecho fluidizado. En el spouted bed el fluido utilizado puede ser gas o líquido. Sin embargo, en el presente trabajo se ha trabajado exclusivamente con gas, concretamente aire.

Gishler y Marthur acuñaron los términos de spouted bed y spouting (términos que se mantendrán en todo momento en el documento debido a su aceptación internacional) en el Consejo Nacional de Investigación de Canadá en 1955 (Marthur y Epstein, 1974). Estos investigadores desarrollaron la técnica inicialmente como método de secado del trigo. Mediante este procedimiento, pudieron usar aire a una mayor temperatura que en los secadores de trigo convencionales sin dañar el grano. Al darse cuenta de que la técnica podía tener una aplicación más amplia, se estudiaron las características del spouted bed usando una variedad de materiales sólidos con aire y agua como medio de expulsión. Sobre la base de este estudio se concluyó que, aunque el mecanismo de sólidos y del gas en esta técnica es diferente de la fluidización, se logra el mismo propósito para partículas gruesas (Marthur y Epstein, 1974).

1.2. CARACTERÍSTICAS DEL SPOUTED BED

El spouted bed se caracteriza principalmente por su geometría debido a que, a diferencia de la fluidización convencional, el lecho se acomoda sobre una base cónica y parte superior cilíndrica o un contactor cónico completo.

Debido a esta disposición, cuando el fluido circula desde la parte inferior del cono hasta la salida en la parte superior atraviesa un lecho de partículas, el cual se comporta de una manera característica, y en cuyo centro se crea una región tubular (denominada spout). Esto sucede

si la velocidad del gas que circula por el reactor es lo suficientemente elevada como para romper el lecho empacado y originar la región. Esta velocidad necesaria es función de diversos parámetros, que se desarrollarán a lo largo del trabajo, como son el diámetro de las partículas del lecho, la altura del lecho, etc.

Los sólidos que se encuentran en la parte inferior del cono, donde se sitúa la entrada del aire, experimentan una fuerza de arrastre superior a la gravitacional de forma que son arrastrados a través del spout hasta la parte superior del lecho. En esa zona dicha fuerza disminuye hasta igualarse a la fuerza gravitacional. De este modo, las partículas caen de forma parabólica creando una fuente y siendo direccionadas predominantemente hacia el exterior, descendiendo por las paredes del reactor (denominada región anular) y volviendo a la posición inicial en la base del cono. Este movimiento cíclico de las partículas es lo que define al spouted bed. En la Figura 1.1 se muestra el movimiento de las partículas en las distintas zonas del reactor.

En consecuencia, las regiones fundamentales que caracterizan al spouted bed son: el spout, la fuente, y la zona anular (Aguado, 1999).

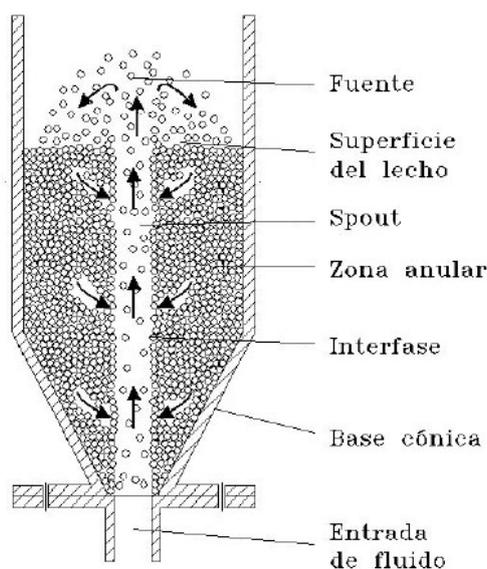


Figura 1.1. Descripción del movimiento de las partículas y de las diferentes regiones en el spouted bed cilíndrico de base cónica.

El spouted bed es un método versátil en el modo de operación, debido a que puede operar en continuo (Pablos, 2017). Esto es muy útil en cuanto a funcionalidad se refiere, dado que permite ser alimentado de forma continua de diversas maneras, lo que a su vez le confiere una mayor aplicabilidad. En la Figura 1.2. se muestran los dos métodos de alimentación en continuo más usados (Marthur y Epstein, 1974).

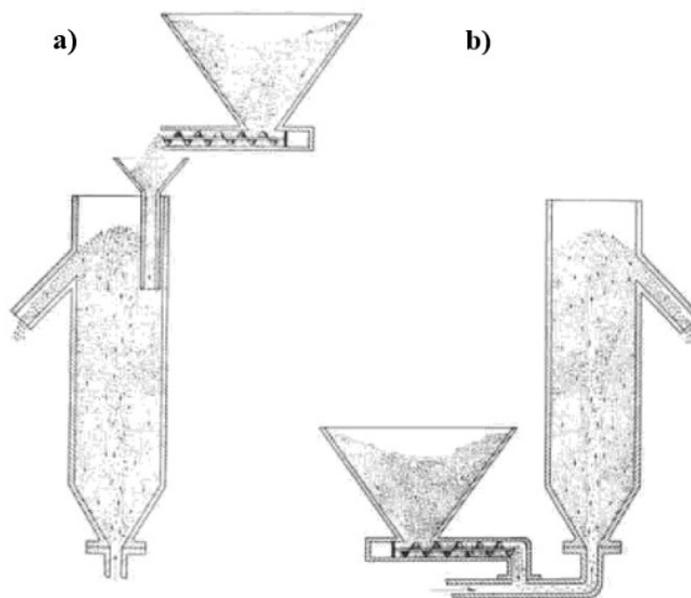


Figura 1.2. Operación en continuo: a) introducción de los sólidos por la parte superior en la zona anular, b) introducción de los sólidos por la parte inferior en la zona central junto con el gas.

1.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SPOUTED BEDS FRENTE A LOS LECHOS CONVENCIONALES

Para los métodos de contacto gas-sólido se han diseñado alternativas a los lechos fijos y fluidizados convencionales. Esta variante (el spouted bed) se emplea cuando los regímenes de los lechos convencionales presentan limitaciones dadas por las características del sólido y los tiempos de residencia del gas (Aguado, 1999). A continuación, se compara este último sistema con los convencionales (Cook y Bridgwater, 1985; San José, 1991; Olazar y cols., 1993; San José y cols., 1996):

- Respecto a la pérdida de carga generada en el reactor, es considerablemente menor que en los lechos fluidizados. Esto se debe a la generación de una fuerza vertical en la zona del spout procedente del fluido introducido, la cual soporta en cierta medida el peso del sólido que se encuentra en la zona anular.
- El contacto gas-sólido es superior al de los lechos fluidizados para partículas relativamente grandes. Esto ocurre principalmente debido a dos desencadenantes: por un lado, una fracción del gas ascendente penetra la zona anular y, por otro lado, debido a que el gas ascendente por el spout desplaza a las partículas de la interfase entre la zona del spout y la zona anular, favoreciendo la transferencia de calor y de materia.
- A diferencia de los lechos fluidizados, el spouted bed es idóneo para materiales con tendencia a aglomerarse, ya que a medida que aumenta la porosidad del lecho, las colisiones entre las partículas y contra la pared son menos frecuentes. Debido a la gran vigorosidad de los spouted beds, sobre todo por el contacto entre el spout y la zona anular

y la atrición en la fuente, se beneficia la ruptura de partículas con tendencia a aglomerarse.

- Para el empleo de materiales de distinto tamaño, en particular para distribuciones discretas, es más adecuado que los lechos fluidizados. Esto es debido a que el spouted bed tiene un mayor rango de operación comparado con lo que sucede en la fluidización con la velocidad de arrastre. De este modo, el arrastre de las partículas más grandes en el spout, asegura que todas las partículas describen los ciclos completos de desplazamiento. Además, la geometría cónica del contactor facilita el desplazamiento de las partículas, eliminando zonas muertas para el sólido, lo cual supone como resultado una menor segregación que en el lecho fluidizado.
- El movimiento en contracorriente del sólido y del gas que se produce en la zona anular de los Spouted bed, evita la variación brusca de temperatura posibilitando el tratamiento de materiales delicados, como alimentos, productos farmacéuticos y materiales poliméricos. Así mismo, permite la utilización de aire a mayor temperatura.
- El diseño del spouted bed, no tiene gran complejidad debido a que lo comprenden componentes simples y no requiere de placa distribuidora, causante de numerosos problemas en la operación en lechos fluidizados, lo que facilita su construcción. Esto confiere una gran versatilidad a la hora de su dimensionado, permitiendo trabajar con distintas cargas.
- El contacto más vigoroso entre el gas y el sólido, unido a las trayectorias cíclicas realizadas por el sólido, confiere al spouted bed un comportamiento adecuado para el granulado, encapsulado y recubrimiento de productos que alcanzan una alta consistencia y una esfericidad uniforme.
- Al igual que los lechos fluidizados permite la alimentación de forma continua. Esto se puede realizar alimentando el sólido por la parte superior directamente a la zona anular o por la parte inferior junto con el gas tal y como se muestra en la Figura 1.2, lo cual no es posible en lechos fluidizados.

Sin embargo, este tipo de tecnología también tiene desventajas o limitaciones.

- Para trabajar con partículas muy grandes, se produce una pérdida de carga elevada en el sistema, de modo que se requiere un mayor caudal de aire para el movimiento de los sólidos y esto conlleva una mayor potencia de la soplante y, por ende, un mayor coste económico.
- Limitación de operación con partículas finas. El uso de este tipo de partículas inestabiliza el sistema restringiendo su uso debido a pérdidas por arrastre de sólidos, este hecho se subsana mediante empleo de sistemas de estabilización, como el confinador de la fuente y los tubos centrales internos.

1.4. APLICACIONES DEL SPOUTED BED

Las primeras unidades comerciales de spouted bed se instalaron en 1962 para el secado de guisantes, lentejas y lino. Desde entonces se han construido unidades en otros países para el secado de una gran variedad de productos, incluida la cristalización por evaporación, así como para la mezcla, y el enfriamiento. Además de otras aplicaciones con futuro prometedor que incluyen la polimerización catalítica, las reacciones catalíticas condicionadas por la selectividad y el tratamiento de desechos, como son la biomasa, residuos plásticos y neumáticos (Epstein y Grace, 2010).

La tecnología de spouted bed tiene diversas aplicaciones en el ámbito industrial, las cuales se pueden clasificar en operaciones físicas y procesos químicos. Entre las más importantes se encuentran:

- Operaciones físicas: Mezclado de sólidos, secado de materiales granulados, recubrimiento de comprimidos, granulado, regeneración de adsorbentes, pulverización y precalentamiento de carbón.
- Procesos químicos: Gasificación de carbón y biomasa, pirólisis de plásticos, craqueo térmico de fracciones del petróleo, producción de coque a partir de turba y producción de clinker de cemento.

1.5. EL SPOUTED BED CÓNICO

Los contactores de spouted bed cónicos combinan las características de los contactores cilíndricos (como la capacidad de manejar partículas gruesas, baja pérdida de carga, movimiento cíclico de las partículas, etc.) con aquellos inherentes a su geometría, como la operación estable en un amplio rango de caudales del gas (Olazar y cols., 1992; Olazar y cols., 1993).

El spouted bed cónico presenta una estabilidad que al igual que ocurre en los lechos fluidizados convencionales no se mantiene en todo el rango de operación. Esto sucede debido a la modificación de los parámetros operacionales como el caudal de aire o el tamaño de las partículas empleadas. Esta problemática operacional puede ser solventada en gran medida mediante la aplicación de variantes en su diseño, las más comunes son la modificación de su geometría externa (ángulo del contactor), e interna (adición de tubos centrales internos) (San José, 1991). Estas variantes proporcionan una mayor estabilidad al sistema y por lo tanto un mayor rango de operatividad.

Las modificaciones geométricas (D_0 , D_C , γ) así como de los parámetros de operación (d_p , H_c) afectan al comportamiento hidrodinámico que condicionan los distintos volúmenes del lecho que se producen en el reactor (San José y cols., 2005). En la Figura 1.3, se muestran las zonas comprendidas por el lecho durante su circulación, que están comprendidas por el spout, la fuente, el núcleo, la periferia y la zona anular.

A diferencia del contactor cilíndrico, el contactor cónico proporciona una mayor estabilidad de operación con menores fluctuaciones del lecho debido al menor bloqueo del spout o la creación de slugging (Olazar y cols., 2004). Además, no existe una altura operativa máxima

de lecho, aunque si una altura mínima por debajo de la cual el sólido de la superficie fluidiza (Olazar y cols., 2004).

De esta forma, la operación puede ser llevada a cabo con tiempos cortos de residencia del gas (tan bajos como milisegundos) en el régimen de jet spouting (Olazar y cols., 1993; Olazar y cols., 1997).

En la zona del spout las partículas sólidas se ponen en contacto con la mayor fracción del gas y ascienden por esta región hasta llegar a la fuente. Aquí tanto el gas como el sólido suben conjuntamente y las partículas caen a la parte superior de la zona anular, sobre la periferia. Por su parte, en la zona anular, las partículas y el gas circulan en contracorriente.

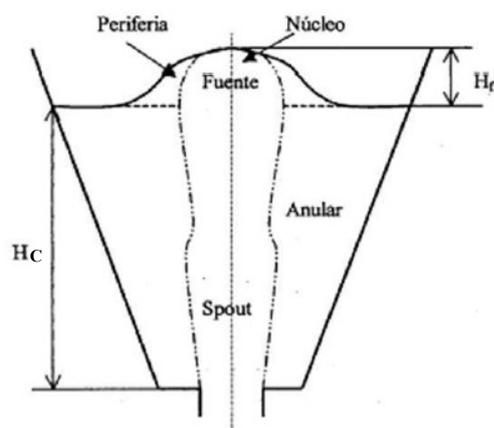


Figura 1.3. Zonas originadas del lecho en un spouted bed cónico.

1.6. DISPOSITIVOS INTERNOS DEL SPOUTED BED

La implementación de los dispositivos internos confiere un comportamiento hidrodinámico más estable, con la finalidad de aumentar el rango de operación estable del spouted bed.

Usualmente se distinguen dos tipos de dispositivos internos diferentes, por un lado, los tubos centrales internos y, por otro, los sistemas de confinamiento, denominados confinadores de la fuente. Aunque ambos tienen la misma finalidad, se emplean en distintas regiones del reactor, pudiendo utilizarlos conjuntamente y, de esta forma, maximizando sus virtudes.

Estos dispositivos han sido ampliamente desarrollados e investigados por el grupo de investigación (PROCAT-VARES) del departamento de Ingeniería Química de la Universidad del País Vasco.

1.6.1. Tubos centrales internos

Los tubos centrales internos, son dispositivos cilíndricos situados en la base del cono, centrados en el eje de entrada del gas y sustentados por tres patas, que se emplean para direccionar el flujo de gas por la parte central del lecho. De este modo, se disminuye la pérdida de carga generada y por tanto se facilita la generación de la zona del spout, agilizando la creación de la fuente.

Se ha trabajado con dos tipos de tubos centrales internos: los tubos no porosos y los tubos con aberturas. Estas configuraciones se muestran en la Figura 1.4. La elección del tipo de dispositivo va a depender de las características de la operación requerida. Ambos dispositivos disponen de su parte inferior abierta de modo que permitan la circulación cíclica del sólido desde la zona anular hasta el spout.

Cada dispositivo posee unas características distintivas. En el caso del tubo no poroso, este proporciona una única dirección y comportamiento vertical del aire a través del lecho, obstaculizando el paso del aire a través del spout hacia la zona anular, permitiendo su paso únicamente por la parte inferior del spout. En cambio, en el tubo de aberturas el aire es capaz de penetrar en la región anular a través de las aberturas y atravesar la región anular. Esta configuración es de interés para aplicaciones en las que se desee una gran transferencia de materia y/o calor.

Los tubos centrales internos se usan con una altura igual a la del lecho y un diámetro igual o superior al diámetro de entrada del aire (Altzibar y cols., 2013). Esto confiere al sistema ciertas ventajas respecto al no uso del tubo central, como la posibilidad de trabajar en condiciones estables con una mayor altura de lecho y una reducción en el requerimiento de caudal (para lograr una velocidad mínima de spouting inferior). Así mismo, también supone una reducción en la tasa de circulación y mezcla de los sólidos (Epstein y Grace, 1997), lo que permite obtener un mayor rango en el que el spouting es estable, además de generar una menor pérdida de carga.



Figura 1.4. Tubos centrales internos no poroso (izq.) y con aberturas (dcha.).

1.6.2. Confinador de la fuente

El confinador es un dispositivo cilíndrico hueco con apertura en su base y se puede colocar a distintas alturas sobre el lecho. Su introducción en el sistema, mostrado en la Figura 1.5, junto con el uso de los tubos centrales internos reduce en gran medida el arrastre de partículas muy finas, esto es debido a que cambia la trayectoria del aire obligándolo a descender desde la fuente hasta la superficie del lecho. Hecho que se traduce en una reducción de la diferencia de presión operativa y en la disminución de la altura de la fuente originada. Debido a esta trayectoria inducida del aire, existe un contacto adicional entre el gas y el sólido, mejorando la eficacia en el ámbito de la transferencia de materia y/o calor (Altzibar y cols., 2017).

Esta modificación del reactor evita el indeseado slugging y produce una baja segregación con el empleo de partículas finas, ampliando el rango de aplicabilidad de los spouted beds

permitiendo tratar partículas de tipo A, B, D y una fracción de C, de la clasificación de Geldart. Este hecho, otorga un rango de regímenes de contacto gas-sólido similar a los lechos fluidizados (Pablos y cols., 2018).

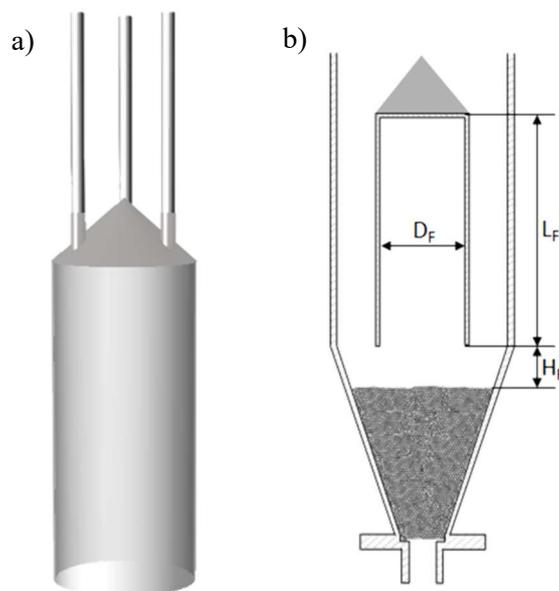


Figura 1.5. a) Configuración del confinador de la fuente, b) Ubicación del confinador de la fuente en el sistema.

1.7. HIDRODINÁMICA DE LOS SPOUTED BEDS

La caracterización de la hidrodinámica del sistema es de utilidad para establecer los márgenes operacionales en los que se consiguen sistemas estables y en base a ello, poder actuar con criterio en los márgenes adecuados al procedimiento requerido.

Sobre una base experimental enfocada a las diferentes geometrías de contactores y al uso de sólidos de distintas características, se han establecido unos parámetros de diseño que delimitan el funcionamiento en los regímenes estables del spouted bed cónico (San José, 1991; Olazar y cols., 1992). Estas condiciones de estabilidad para sistemas de contacto gas-sólido vienen determinadas en función de los siguientes parámetros geométricos:

1. La relación D_o/D_i : tanto para régimen de spouting como para el jet spouting debe situarse en un rango de $1/2$ y $5/6$.
2. Ángulo del cono, γ , tiene un valor de 28° como límite inferior para el régimen de spouting y sin límite superior. Para el régimen de jet spouting, sin embargo, el límite inferior y superior son 28° y 45° , respectivamente.
3. La relación D_o/d_p para contactores cónicos en régimen de spouted bed se sitúa entre 2-60, y para régimen de jet spouting entre 1-80. Mientras que para contactores cilíndricos debe situarse en torno a 20-30 (San José, 1991; Olazar y cols., 1992).

1.7.1. Clasificación de las partículas

El tamaño de partícula a tratar tiene gran repercusión respecto a la hidrodinámica y, por ende, al régimen de operación del sistema. Para su clasificación se estudió el comportamiento de las partículas en lechos fluidizados a temperatura ambiente y presión atmosférica (Geldart, 1973). De este modo, se obtuvo una clasificación de cuatro clases de partículas bien definidas, según su densidad y diámetro de partícula. En la Figura 1.6. se muestra gráficamente su clasificación.

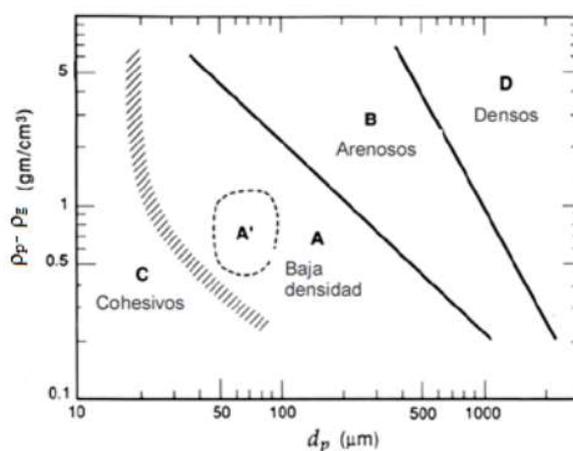


Figura 1.6. Clasificación de las partículas de Geldart.

Mediante esta clasificación es posible predecir de manera aproximada el comportamiento de las partículas suspendidas en el fluido.

Las partículas cohesivas o polvos se encuentran en el grupo C. Son partículas difíciles de fluidizar debido a que las fuerzas ejercidas entre ellas son difíciles de romper.

Las partículas clasificadas en el grupo A, denominadas aireables, se caracterizan por un diámetro promedio de 20 a 100 μm, y una densidad menor a 1400 kg/m³. Estas partículas fluidizan a bajas velocidades, mientras que a altas velocidades aparecen pequeños burbujes.

Las partículas del grupo B, son sólidos de tipo arenoso que fluidizan bien. En este grupo las burbujas alcanzan un tamaño considerable y aparecen en el momento que se alcanza la velocidad mínima de fluidización. El diámetro de partícula se encuentra entre 40 y 500 μm y su densidad aparente tiene un rango entre 1400-4000 kg/m³.

Los sólidos de tipo D son las partículas propicias para el spouted bed, debido a que el gas ocasiona el spout y se requieren grandes velocidades de aire para obtener la fluidización. Con estas partículas se pueden obtener lechos burbujeantes utilizando lechos de poca altura y una velocidad superficial ligeramente superior a la mínima de fluidización.

1.7.2. Curvas características

En el spouted bed, al igual que sucede en la fluidización convencional, la evolución de la pérdida de carga originada con la velocidad del gas es de utilidad para la determinación de los regímenes existentes y de los parámetros hidrodinámicos más representativos, como la velocidad mínima de spouting.

Experimentalmente en el grupo de investigación del departamento (PROCAT-VARES) de Ingeniería Química de la UPV/EHU, se ha observado que esta representación difiere cualitativamente de los tipos de sólidos empleados, de esta forma, se obtienen dos curvas características, por un lado, para partículas gruesas y, por otro lado, para partículas finas.

a. Partículas gruesas

La curva de pérdida de carga con la velocidad del aire mostrada en la Figura 1.7, es representativa para partículas gruesas. En esta se obtienen cuatro regímenes de operación (San José, 1991):

1. El régimen de lecho fijo se define como un lecho estanco en el cual el aire no es capaz de elevar los sólidos debido a la baja velocidad del aire entrante. Este régimen se caracteriza por un gran aumento de la pérdida de carga del lecho.
2. El régimen de spouting se caracteriza por la creación del spout, originando una sección de paso del aire, que origina la fuente y da lugar a una disminución de la pérdida de carga del lecho. Este régimen da comienzo a la velocidad mínima de spouting, la cual se define como la velocidad mínima necesaria para mantener el régimen de spouting.
3. El régimen de transición se obtiene a velocidades más elevadas del aire dando como resultado una disminución en la pérdida de carga del lecho y un aumento de la porosidad en la zona anular.
4. El régimen jet-spouting tiene lugar en el momento en el cual la pérdida de carga se estabiliza en un rango de velocidad elevado. Este régimen se caracteriza por el movimiento vigoroso de las partículas, aumentando el contacto gas-sólido y, por tanto, mejorando la transferencia de calor y materia. A su vez, debido a la elevada porosidad del lecho resulta prácticamente indiferenciable la zona anular del spout.

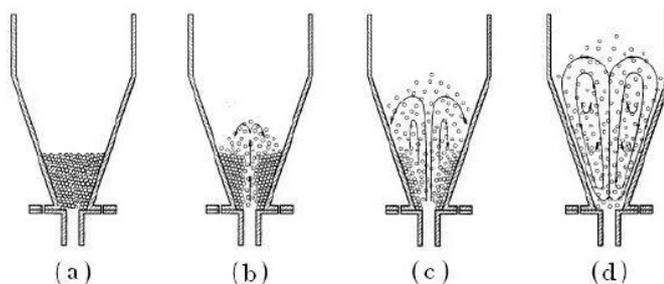
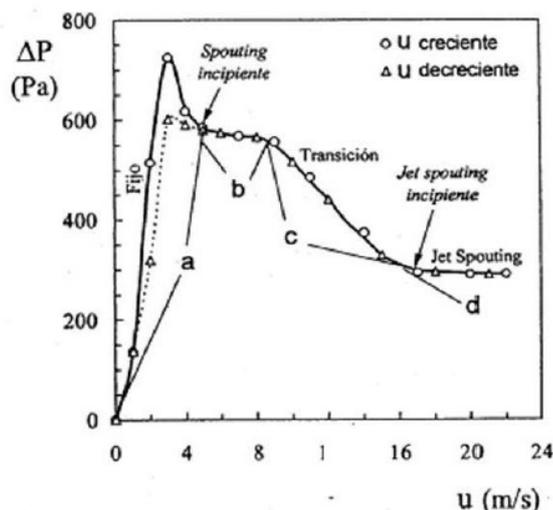


Figura 1.7. Representación de la pérdida de carga respecto a la velocidad del gas en los distintos regímenes presentes en el spouted bed cónico para partículas gruesas (San José, 1991).

b. Partículas finas

Debido a las investigaciones realizadas con partículas finas por el grupo del departamento (PROCAT-VARES) de Ingeniería Química, se han extraído una serie de resultados y conclusiones relevantes.

Para el caso de partículas finas ($d_p < 1$ mm), es necesario la utilización de tubos centrales internos, ya que sin ellos no es posible obtener un sistema estable. Por otro lado, empleando partículas finas con tubos centrales internos, la operación está limitada a trabajar cerca de la velocidad mínima de spouting, debido a que, con velocidades superiores de aire, se produce un arrastre de las partículas y, por otra parte, la pérdida de carga no tiene diferencias representativas.

Para casos de $D_0/d_p > 20-30$ con el uso de velocidades de aire elevadas es necesario el uso de sistemas de confinamiento. Estos, con ausencia de tubos centrales internos, confieren estabilidad al sistema y detienen el arrastre de los sólidos.

En las Figuras 1.8, 1.9 y 1.10, se muestran las curvas características obtenidas para las diferentes configuraciones y regímenes (Tellabide y cols., 2020). Es necesario aclarar que, aunque las curvas características tengan una apariencia similar, su forma es dependiente de la configuración de los tubos centrales internos. De hecho, el uso de tubos centrales internos

abiertos o no porosos o con ausencia de ellos, condiciona el comportamiento del sistema y, cada configuración tiene un régimen distinto.

Con la operación sin tubo central interno, en la curva característica (mostrada en la Figura 1.8) se diferencian cuatro regímenes de operación. Inicialmente se tiene un régimen de lecho fijo, en el cual las partículas se encuentran amontonadas y estáticas. A continuación, aumentando la velocidad del aire y superando la velocidad mínima de spouting se obtiene el régimen de spouting, al cual suceden los regímenes de spouting completo y régimen de slugging, respectivamente.

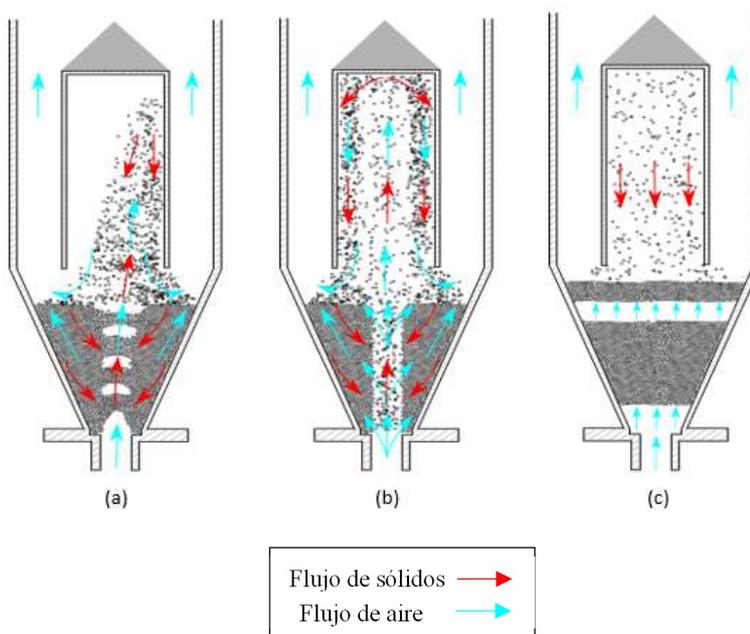
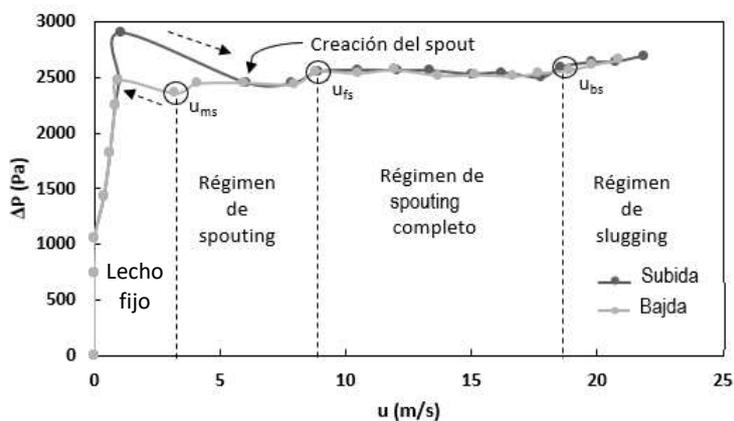


Figura 1.8. Curva característica de los spouted beds cónicos a diferentes regímenes obtenidos sin tubo central interno: a) régimen de spouting, b) régimen de spouting completo, c) régimen de slugging (Tellabide y cols., 2020).

Al igual que en la configuración anterior, con el uso del tubo central con aberturas, en la curva característica (mostrada en la Figura 1.9) se obtienen cuatro regímenes, régimen de lecho fijo, régimen de spouting, régimen de spouting completo y régimen de slugging. Sin

embargo, respecto al método de utilización sin ningún tubo central, se observan diferencias significativas en el movimiento del lecho en el régimen de spouting. El cual se refleja en una disminución de la velocidad mínima de spouting y, por lo tanto, de la región de lecho fijo. Esto se debe a la explicada estabilidad que le confiere al sistema el uso de tubo central interno.

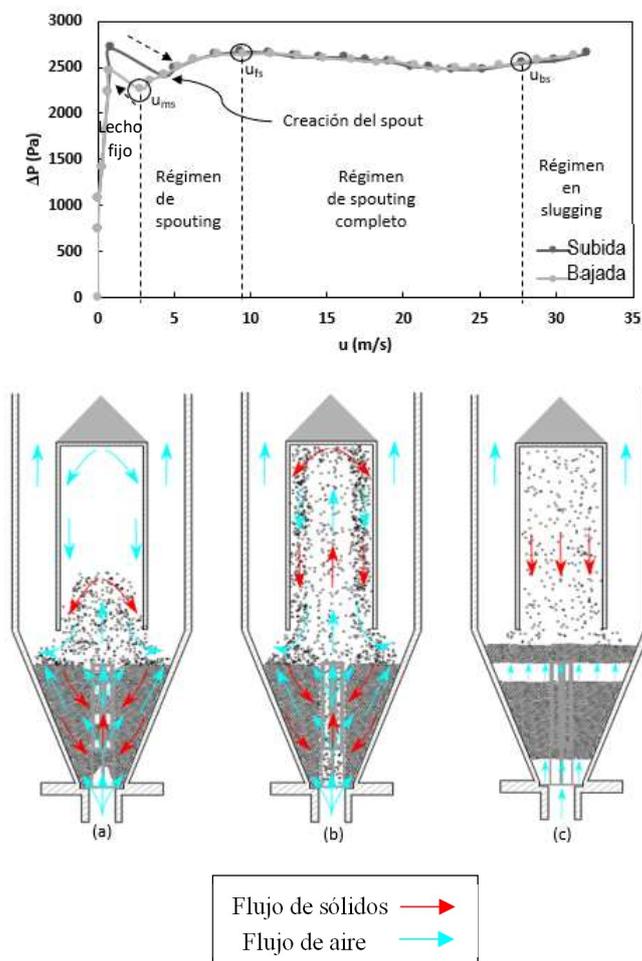


Figura 1.9. Curva característica de los spouted bed cónicos a diferentes regímenes obtenidos con tubo de aberturas: a) régimen de spouting, b) régimen de spouting completo, c) régimen de slugging (Tellabide y cols., 2020).

Por último, la introducción del tubo central no poroso, en la curva característica (mostrada en la Figura 1.10) dista de las anteriores en cuanto a la obtención de un régimen de spouting con un intervalo de velocidades muy amplias, debido a que la velocidad mínima de spouting se obtiene a valores de velocidad más bajos y debido a la gran estabilidad que le proporciona el tubo central no poroso no se obtiene un régimen de inestabilidad previo al arrastre de los sólidos.

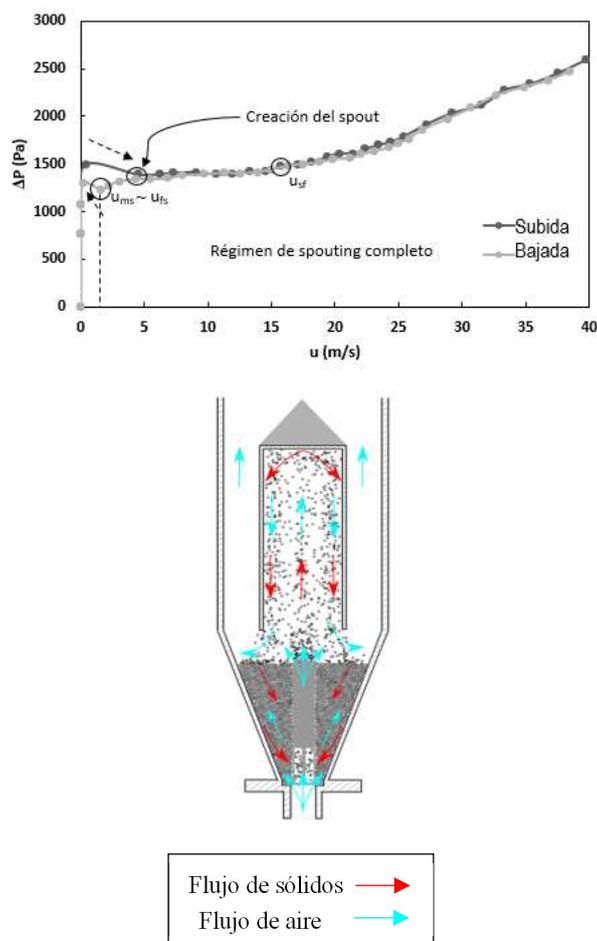


Figura 1.10. Curva característica de los spouted bed cónicos a régimen de spouting completo (Tellabide y cols., 2020).

1.8. FLUCTUACIONES DE PRESIÓN

El spouted bed cónico opera de forma continua en regímenes de contacto gas-sólido estables, sin embargo, a medida que aparecen pequeñas inestabilidades en el sistema se generan pequeñas discontinuidades en el contacto gas-sólido. Debido a este fenómeno se generan fluctuaciones en la presión del sistema que son de utilidad para la determinación de la hidrodinámica del spouted bed.

El enfoque clásico para la obtención de regímenes de estabilidad y parámetros característicos en los spouted beds cónicos (como la velocidad mínima de spouting) es utilizar la pérdida de carga del lecho frente a los datos de velocidad del aire a medida que varía el caudal del aire a la entrada del sistema. Menos común, pero posiblemente un enfoque alternativo es la medida de las fluctuaciones de presión (Mostoufi y cols., 2015).

Como se observa en la bibliografía, el análisis y la interpretación de los datos de fluctuación de la presión obtenidos de los spouted beds cónicos están lejos de ser completos.

El análisis de señales de fluctuaciones de presión para investigar principalmente la hidrodinámica de los lechos se realiza comúnmente mediante dos procedimientos: el procedimiento estadístico y el procedimiento de frecuencia, en el cual la potencia de una señal o una distribución de tiempos de series se describen mediante la densidad espectral de potencia (DSP, mostrada en la Ecuación 1). La densidad espectral de potencia es la medida de la potencia de repetitividad de un conjunto de datos aleatorios, en un intervalo de tiempo, de modo que esta técnica permite identificar la intensidad de sus fluctuaciones (Xu y cols., 2004).

Este análisis se usa para reconocer y caracterizar la existencia de diversos regímenes de flujo: lecho fijo, régimen de spouted bed, burbujeante y slugging. La técnica consiste en la utilización de la transformada de Fourier (cuya expresión se muestra en la Ecuación 2) para medir las fluctuaciones de presión y la posterior descripción de la evolución del comportamiento del lecho desde el régimen de lecho fijo hasta el slugging, así como la determinación de la velocidad mínima de spouting (Mostoufi y cols., 2015; Piskova y cols., 2008).

$$DSP = \int_{-\infty}^{\infty} |F(f)|^2 dt \quad (1)$$

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi f t} dt \quad (2)$$

La utilización de la transformada de Fourier se emplea para el cambio de la señal percibida en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y de esta forma obtener la distribución de las frecuencias para distintos caudales de aire empleado.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

En las últimas décadas se han desarrollado numerosos trabajos con los objetivos de investigar la hidrodinámica que presentan los sólidos y gases contenidos en el sistema, para su desarrollo y operación óptima en sus aplicaciones. Para dichos estudios, se ha indagado en torno al análisis de la pérdida de carga generada en el sistema de contacto gas-sólido por multitud de procedimientos; mediante la medición directa de la variación de presión, grabación visual del movimiento de las partículas sólidas haciendo uso de cámaras de alta velocidad, etc.

Sin embargo, en este Trabajo Fin de Grado se ha evaluado la frecuencia predominante del sistema, con el fin de vincularla a los regímenes de fluidización conocidos y de esta forma, analizar las influencias que tienen sobre su comportamiento las distintas modificaciones realizadas en el spouted bed.

El objetivo principal del proyecto es el estudio de la frecuencia de las interacciones entre los sólidos y gas-sólido generadas en el spouted bed y su dependencia de las diversas variantes de diseño más empleadas como son el diámetro de entrada del gas, diámetro de partícula de los sólidos, densidad de los sólidos, altura del lecho, empleo de tubos centrales internos y ángulo del contactor para la obtención de los regímenes del sistema y, por ende, sus rangos de estabilidad y operatividad.

Los resultados y conclusiones obtenidos en este trabajo pueden incluirse en artículos y/o tesis de modo que puedan continuarse a partir de las resoluciones mostradas, con el empeño del aumento del conocimiento en este campo.

3. EXPERIMENTAL

En este apartado se describe la metodología aplicada, el equipo utilizado, las condiciones experimentales, así como el procedimiento realizado para la obtención de los resultados.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El equipo utilizado para la realización de los experimentos puede verse en la Figura 3.1, el cual, consta de una soplante, un caudalímetro, un medidor de presión diferencial, un contactor (con posibilidad de sustitución) y un sistema de separación.

Se dispone de un ciclón colocado en paralelo al sistema de filtración de sólidos, sin embargo, este no se ha utilizado, ya que está destinado a la separación de partículas gruesas, lo que no es de utilidad dado que se ha experimentado con sólidos finos principalmente, y en los experimentos en los que se han utilizado partículas gruesas (vidrio) sus condiciones experimentales distaban del arrastre de los mismos.

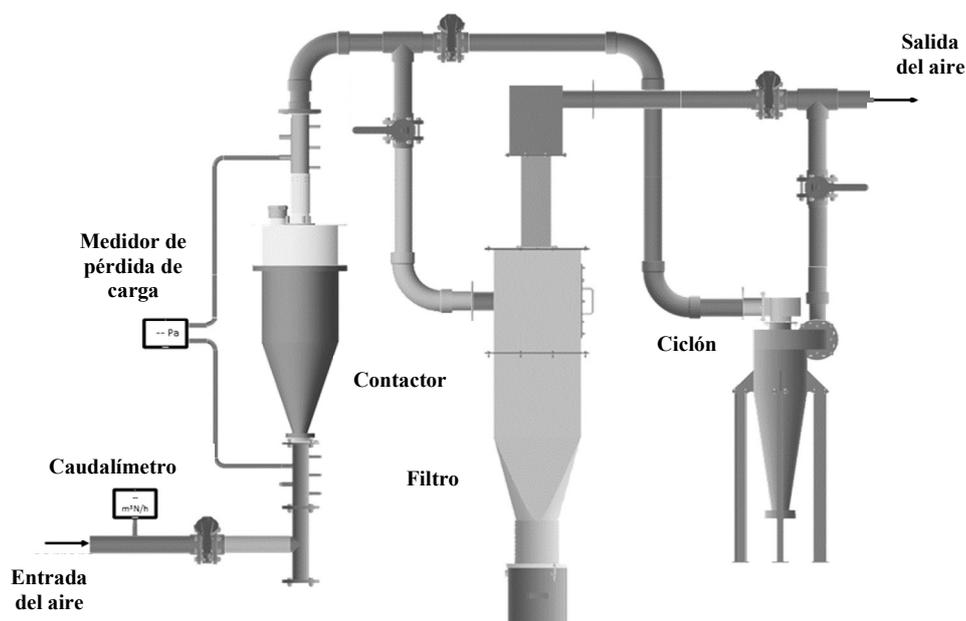


Figura 3.1. Esquema de la planta piloto de spouted bed.

La soplante se sitúa en la planta inferior del edificio, tiene una potencia de 5.5 kW y su cometido es enviar el fluido al sistema. En los experimentos realizados se trabaja únicamente con aire. Debido al sólido fino utilizado en este trabajo, es necesario utilizar un sistema de medición del caudal de gran precisión para valores pequeños. Por ello, se dispuso de un caudalímetro térmico capaz de medir con precisión caudales bajos.

El medidor de presión diferencial mide la diferencia de presión entre dos puntos, en este caso, la pérdida de carga generada por el lecho en el contactor. Tiene dos posiciones de medida, uno de ellos situado en la parte inferior al lecho, en la entrada del aire, y el otro en la parte superior del contactor, en la salida del fluido. A su vez, se dispone de un segundo medidor de presión (ver Figura 3.2.) el cual es capaz de medir y registrar de manera más

precisa mayor cantidad de datos por segundo, en torno a 100 veces más que el medidor de presión diferencial ya disponible.



Figura 3.2. Caudalímetro (izda.), medidor de presión diferencial de la planta (centro) y medidor de presión diferencial de alta precisión (dcha.).

El caudalímetro es de tipo térmico y se basa en la medida de la variación de la temperatura en una resistencia. El medidor de presión diferencial contiene un material piezoeléctrico que convierte la deformación del diafragma interno en una corriente eléctrica.

El sistema se dirige mediante un panel de control táctil situado junto a la planta piloto, que permite entre ellas, encender/apagar la soplante, modificar el caudal de aire proveniente de la misma mediante una válvula automática by-pass. Además de disponer de válvulas manuales las cuales permiten modificar la entrada de aire suministrada por la soplante, así como intercambiar el equipo de tratamiento de los gases de salida entre el sistema de ciclón y de filtración. A su vez, el panel de control muestra valores en pantalla tales como la pérdida de carga, caudal de aire circulando, etc.

En la Figura 3.3. se muestra la pantalla del panel del control con las opciones configurables de apertura de la soplante.



Figura 3.3. Pantalla del panel de control de manejo de la soplante.

Los valores de presión y de caudal de operación, se modifican en la pantalla accediendo al apartado de parámetros (Figura 3.4), que se encuentra en la zona inferior derecha, como se observa en la Figura 3.3.

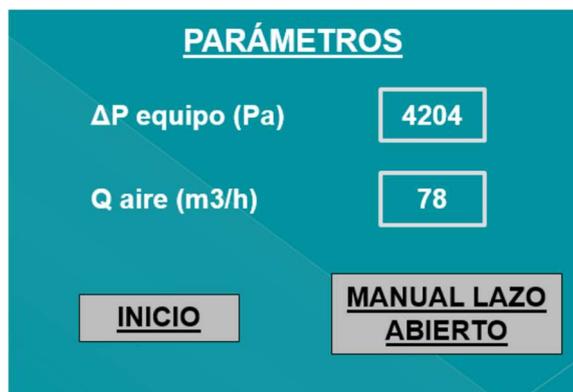


Figura 3.4. Parámetros operacionales del sistema obtenidos en la medición.

3.1.1. Calibrado de los dispositivos

Para la obtención de resultados veraces se deben conocer con exactitud las condiciones de los equipos empleados, como son el caudalímetro y el medidor de presión diferencial (el medidor de alta precisión no precisa de calibrado).

Inicialmente, se lleva a cabo el calibrado con el dispositivo encargado de la medición de la pérdida de carga del lecho, para ello se emplean dos manómetros (uno relleno de agua para presiones inferiores, y otro relleno de mercurio para presiones superiores) y se comparan los valores de pérdida de presión obtenidos por ambos métodos.

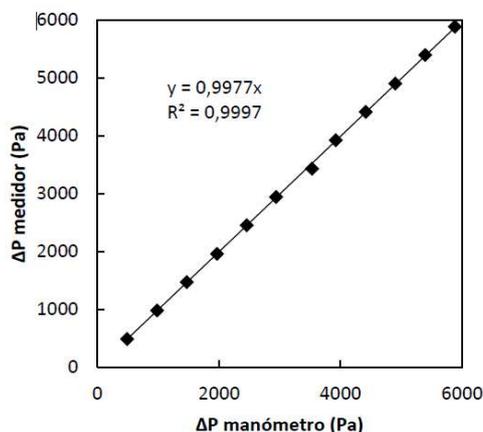


Figura 3.5. Recta de calibrado del medidor de presión diferencial.

Tal y como se observa en la Figura 3.5., se obtiene un coeficiente de correlación muy elevado, sin embargo, se hace uso de la ecuación de ajuste para obtener resultados precisos.

De la misma forma, se han empleado diversos rotámetros para el calibrado del caudalímetro térmico. Con el empleo del rotámetro, dado que el rango de caudales de operación es amplio, se emplean tres dispositivos para el calibrado, un rotámetro que permite medir caudales

bajos, desde 0 hasta 30 m³/h, otro intermedio de 30 a 60 m³/h y otro grande, desde 60 hasta 560 m³/h.

Debido a que el valor de caudal obtenido con el caudalímetro se da en condiciones normales (0°C y 1 atm.) y los medidos con el rotámetro no están en estas mismas condiciones (la temperatura ambiente del laboratorio no es 0°C), se transforman a condiciones normales.

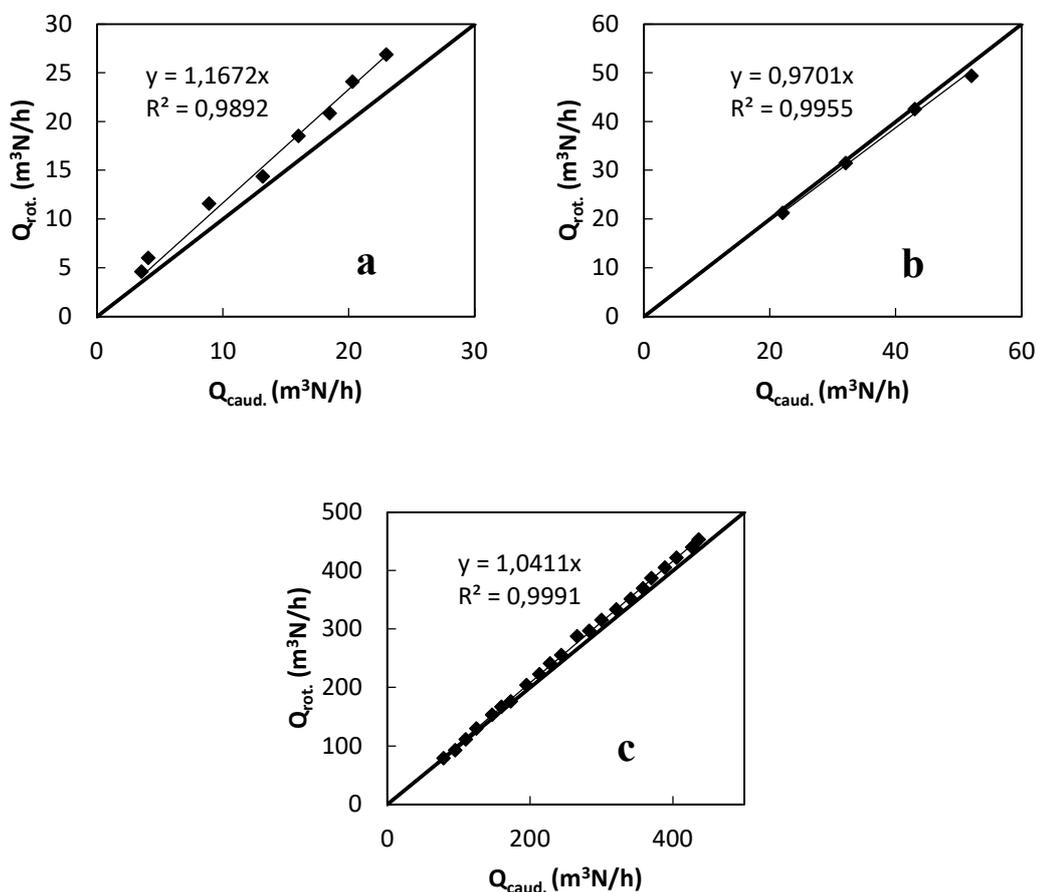


Figura 3.6. Recta de calibrado del caudalímetro para distintos valores: (a) de 0 a 30 m³N/h, (b) de 30 a 60 m³N/h y (c) de 60 a 560 m³N/h.

Mediante este método, no se obtiene una gran desviación, sin embargo, a fin de obtener unos resultados los más fiables posibles se emplean los factores de corrección para cada rango de operación.

En la Figura 3.7, se muestran tanto el manómetro como el rotámetro empleados en la calibración de los equipos.

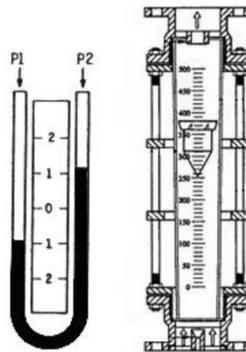


Figura 3.7. Manómetro (izda.) y rotámetro (dcha.).

En la Tabla 3.1 se muestran los coeficientes de correlación del caudalímetro empleado para los distintos rangos de operación.

Tabla 3.1. Valores de los coeficientes de correlación del caudalímetro.

Rango de operación (m³N/h)	0-30	30-60	60-560
Coefficiente de correlación	1.1672	0.9701	1.0411

3.2. CONDICIONES EXPERIMENTALES

El procedimiento experimental para la obtención de los resultados se muestra de manera esquemática en la Figura 3.9.

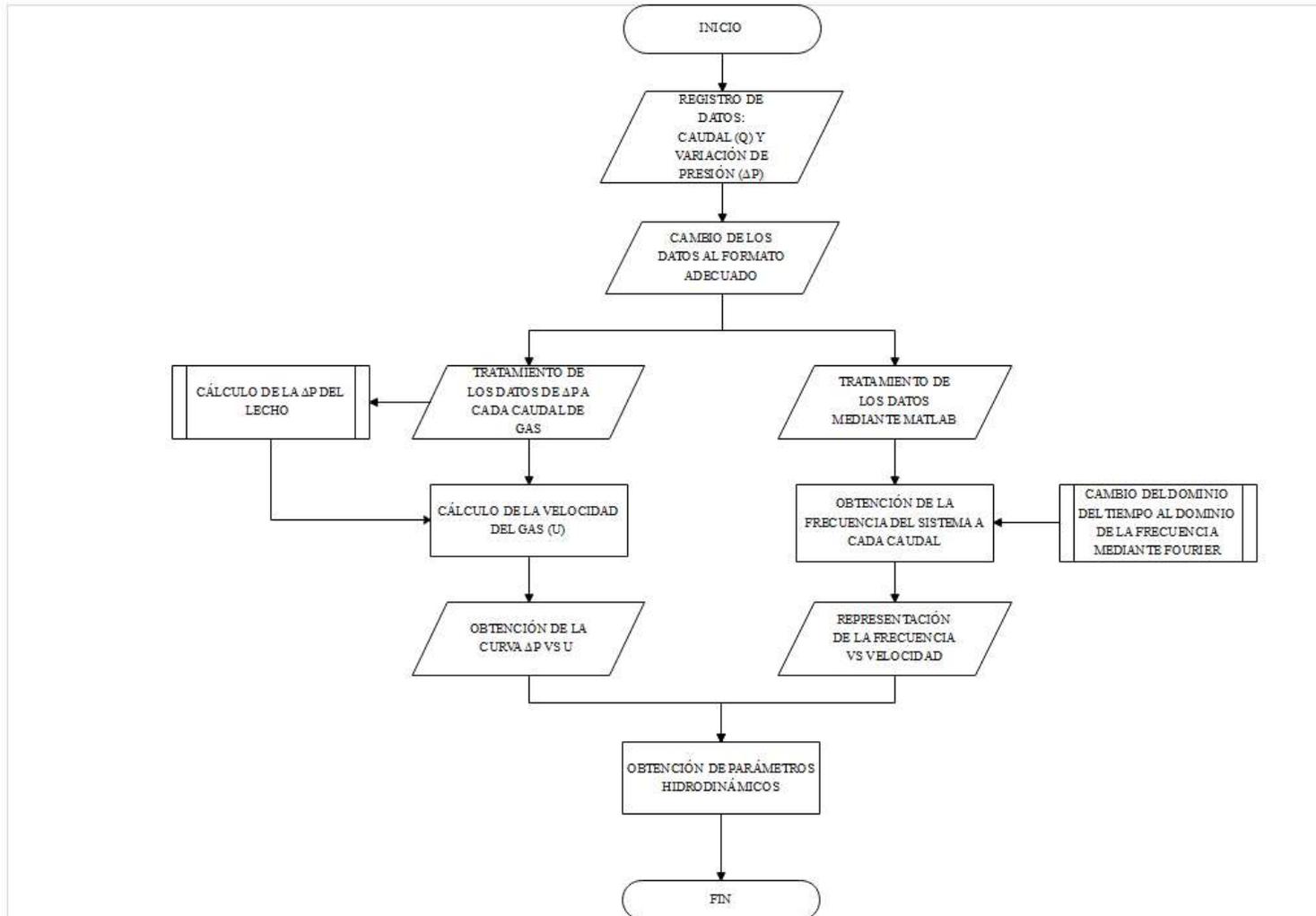


Figura 3.9. Esquema del procedimiento experimental desarrollado.

En los ensayos experimentales realizados se han modificado diversos parámetros tanto del sistema como operacionales, dado que estos, condicionan la hidrodinámica del sistema y por tanto son óptimos para su estudio. Los parámetros modificados se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Modificaciones de los factores geométricos utilizados en los ensayos.

Factor geométrico	Valor	Unidad
γ	28-36-45	°
D_C	0.2	m
D_F	0.15	m
D_0	0.03-0.04-0.05	m
D_T	0.04	m
H_0	0.15-0.22-0.27	m
H_f	0.06	m
L_F	0.5	m
L_H	0.07	m
L_T	0.22-0.27	m
Tipo de tubo central interno	ST, TA, TS	-

Donde ST, TA y TS, corresponde a sin tubo central, tubo central de aberturas y tubo central no poroso, respectivamente. En cuanto al tubo central interno con aberturas (TA), cabe destacar que posee un ratio de abertura de 57%.

En la Figura 3.9. se ven representadas los factores geométricos cuyos valores se encuentran en la Tabla 3.4.

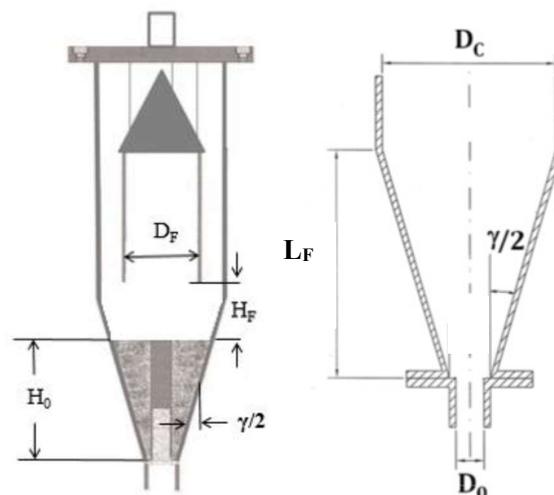


Figura 3.9. Factores geométricos del sistema.

En cuanto a los dispositivos centrales internos empleados, se encuentran los tubos con aberturas y los no porosos, estos se muestran en la Figura 3.10.

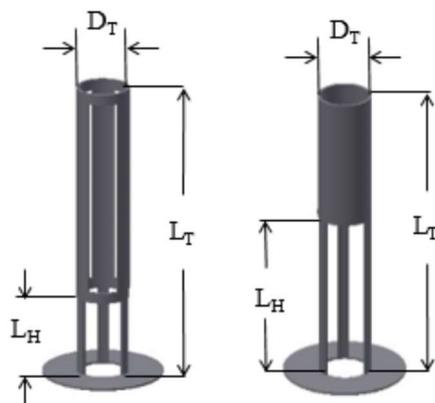


Figura 3.10. Representación de los tubos centrales de aberturas y tubos no porosos, de izq. a dcha., respectivamente.

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

En los experimentos desarrollados se han empleado diversos sólidos, tales como arena, serrín y vidrio. Para la caracterización del material se han empleado dos métodos, el primero, para determinar la distribución de tamaño de partícula mediante granulometría y posteriormente, la obtención de la densidad.

Para llevar a cabo la granulometría se recoge una cantidad considerable de muestra y se realiza un tamizado con distintos tamaños de tamices, de este modo se obtiene el tamaño medio de partícula, los cuales se muestran en la Tabla 3.5.

Por otro lado, para la obtención de su densidad, se emplea la ecuación 3, que se muestra a continuación.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

El procedimiento consiste en introducir en un recipiente de volumen conocido, como es el caso de una probeta, cierta cantidad pesada de sólidos. El volumen se obtiene introduciendo agua a la probeta junto con los sólidos, de manera que el agua penetra por los poros de los sólidos y desplaza al aire, hasta alcanzar un nivel de volumen conocido. De esta forma, aplicando la ecuación 3 se obtiene la densidad de los distintos sólidos, cuyos valores se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Tipos de sólidos empleados y sus propiedades principales.

Partícula	d_p (m)	ρ_s (kg/m ³)	Clasificación de Geldart
Arena	$2.46 \cdot 10^{-4}$	2380	B
Serrín	$3.43 \cdot 10^{-4}$	490	C
Vidrio	10^{-3}	2420	D

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se van a abordar en distintos apartados los resultados obtenidos mediante el método experimental realizado en el spouted bed cónico con distintas variantes de diseño del reactor, modificando el ángulo de la base cónica y el diámetro de entrada del aire, así como otros parámetros operacionales: tamaños y densidades de partículas, altura del lecho e incorporación de distintos tubos centrales internos. Con el fin de identificar naturalezas de estabilidad y comportamientos hidrodinámicos del sistema a través de las frecuencias del sistema, estableciendo algunas tendencias tanto particulares como generales.

4.1. SEÑALES DE LA PRESIÓN DIFERENCIAL

Para llevar a cabo los experimentos, tal y como se ha explicado en el apartado anterior (3. Experimental) se registran las fluctuaciones de caída de presión del sistema en diferentes situaciones operativas y tipos de sistema, esto es, para cada tipo de sólido evaluar con las tres variantes de tubos centrales internos (aberturas, no porosos y sin tubo central), diferentes diámetros de entrada del gas y ángulos del contactor cónico, en un rango de velocidades de operación (siempre con sistema de confinación).

Para la exposición y evaluación de las señales obtenidas se ha seleccionado de todas las empleadas un tipo de configuración determinada (sin tubo central interno), debido a que en las demás configuraciones realizadas se han obtenido las mismas tendencias.

Para su evaluación se deben estudiar en las condiciones más semejantes posibles, de este modo se han mantenido constantes los demás parámetros variables en los valores de $H_0=0.22$ m, $D_c=0.20$ m, $\gamma=36^\circ$, $D_0=0.04$ m y sin tubo central interno únicamente modificando los tipos de sólidos. Además, dado que generalmente el parámetro hidrodinámico más interesante es la velocidad mínima de spouting, se muestra en la Figura 4.1. la fluctuación de la pérdida de carga registrada en el sistema en un segundo para los tres tipos de sólidos (a) arena, (b) serrín y (c) vidrio a la velocidad mínima de spouting.

Con el empleo de los tres sólidos se obtiene una forma sinusoidal de caída de presión. Esta tendencia continúa a lo largo de todo el tiempo registrado, no obstante, para una mejor apreciación, se muestra reducida la escala del eje de abscisas a un segundo.

En las Figuras 4.2 y 4.3 correspondientes a los sistemas con serrín y vidrio se observa ruido en la señal de la fluctuación. Esta distorsión de la señal enmascara la información útil y dificulta su lectura. Con el empleo de arena (Figura 4.1 (a)) se observa una menor presencia de ruido, dando lugar a una mayor amplitud de onda y un mayor intervalo y caída de presión. Por otro lado, al utilizar serrín (Figura 4.1 (b)), se producen menores fluctuaciones y valores en la caída de presión respecto a los otros sólidos empleados, y una mayor presencia de ruido que en el caso de la arena. En los experimentos con vidrio (Figura 4.1. (c)) el ruido se acentúa y se obtienen picos más discordantes además de valores más elevados en la caída de presión.

Analizando globalmente la señal obtenida con los tres tipos de sólidos, se concluye que el sólido que posee un menor diámetro de partícula y una densidad considerablemente elevada (como es la arena) obtiene una señal más clara con amplias oscilaciones en unos rangos más elevados de ΔP . Sin embargo, el sólido con un diámetro de partícula pequeño y una densidad

baja, como es el caso del serrín, muestra una ligera presencia de ruido en la señal, menores amplitudes de onda y en menores rangos de ΔP . Finalmente, el vidrio cuyo diámetro de partícula y densidad es elevado se obtiene mayor presencia de ruido con altos valores y rangos de la caída de presión.

Por lo tanto, se puede afirmar que la presencia de ruido en la señal es proporcional al régimen de operación.

Estas fluctuaciones en la caída de presión registradas se estudian y tratan en los apartados posteriores.

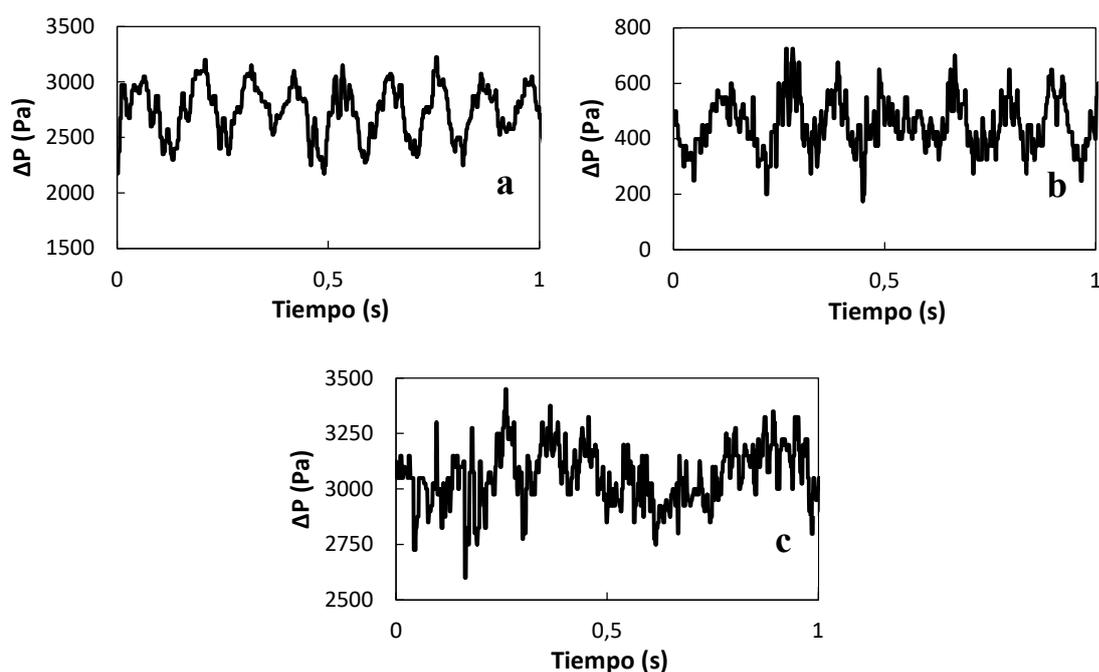


Figura 4.1. Señal de la fluctuación de la pérdida de carga obtenida en el reactor a lo largo del tiempo con la velocidad del aire en el valor mínimo de spouting con diferentes sólidos, (a) arena, (b) serrín y (c) vidrio.

4.2. OBTENCIÓN DE LA FRECUENCIA PREDOMINANTE

Tras evaluar las fluctuaciones de la caída de presión originada respecto al tiempo, se realiza un estudio de modo que se determina la frecuencia predominante en el sistema a las condiciones de operación a las que se le ha sometido. Este método establece el número (o intensidad) de veces que se ha repetido una frecuencia debido al movimiento surgido en el sistema para cada velocidad del aire, mediante la densidad espectral de potencia (DSP). De modo que la frecuencia más repetida es considerada como la frecuencia predominante. Este aspecto requiere del programa informático “Matlab”.

Al igual que el apartado anterior, se deben mantener unos parámetros de referencia invariantes, los cuales se han escogido: $H_0=0.22$ m, $D_C=0.20$ m, $\gamma=36^\circ$, $D_0=0.04$ m, $D_T=0.04$

m y con tubo central interno de aberturas. Se han modificado únicamente los sólidos utilizados y la velocidad de entrada del aire.

En las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se muestra la densidad espectral de potencia de las frecuencias para cuatro situaciones de velocidades del aire diferentes, todas ellas, representativas de regímenes significativos con arena, serrín y vidrio, respectivamente.

4.2.1. Partículas finas

Al utilizar arena (Figura 4.2) en el régimen de lecho fijo (a), es decir, a bajas velocidades se obtiene mayor DSP de las frecuencias a valores elevados (en torno a 60 Hz). Esta tendencia se invierte en el régimen de spouting (b), es decir, a velocidades mayores, ya que se obtienen unos valores más elevados de DSP a bajas frecuencias (cerca de 8 Hz). Esta tendencia se mantiene al continuar aumentando la velocidad del gas (c y d).

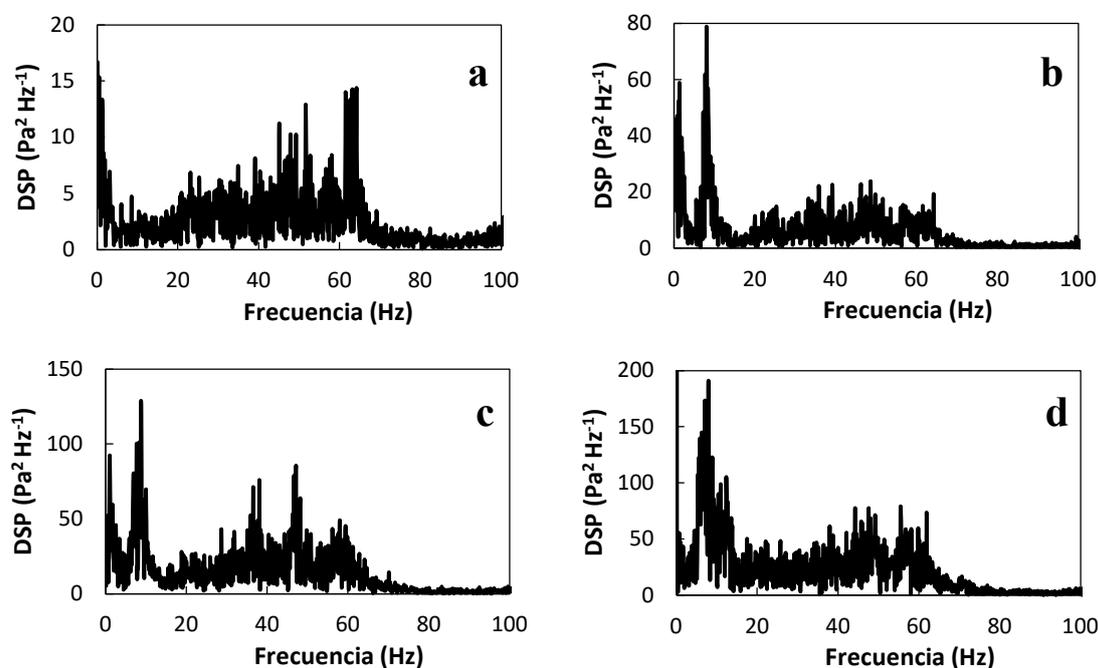


Figura 4.2. Representación para la obtención de la frecuencia predominante con empleo de arena a distintas velocidades, (a) régimen de lecho fijo, (b) régimen de spouting (u_{ms}), (c) régimen de spouting (a mayor velocidad, $4 \cdot u_{ms}$), (d) régimen de spouting (a velocidad más elevada, $6 \cdot u_{ms}$).

Respecto al uso de serrín (Figura 4.3) muestra una tendencia similar al de la arena. En el régimen de lecho fijo (a) las frecuencias que tienen mayor repetitividad (o DSP) se sitúan en valores próximos a 60 Hz, conforme se aumenta la velocidad del aire (b y c) hasta la obtención del régimen de spouting, va aumentando la DSP de las frecuencias más bajas hasta que finalmente alcanzan la entidad suficiente como para establecerse como frecuencias predominantes. Este hecho se explica que en el régimen de lecho fijo las frecuencias predominantes altas (en torno a 50-60 Hz) no se deban al contacto gas-sólido, sino a frecuencias propias del equipo (mayoritariamente al motor de la soplante). Realmente la

frecuencia del sistema se encuentra en torno a valores de cero, dado que los sólidos se encuentran estáticos.

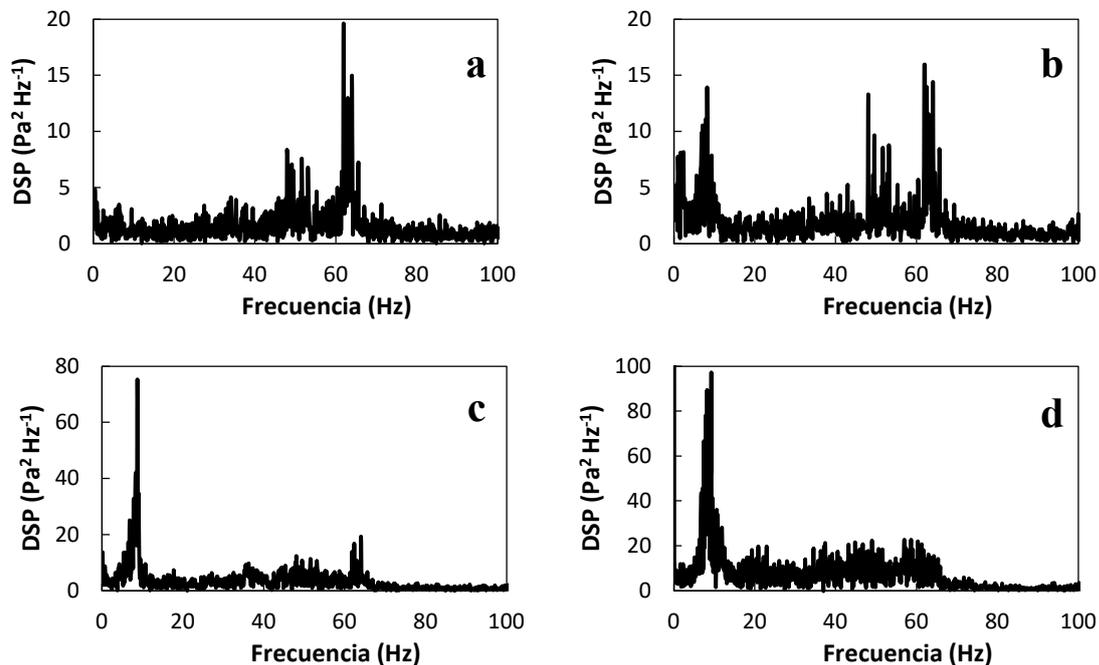


Figura 4.3. Representación para la obtención de la frecuencia predominante con empleo de serrín a distintas velocidades, (a) régimen de lecho fijo, (b) régimen de spouting (u_{ms}), (c) régimen de spouting (a mayor velocidad, $3 \cdot u_{ms}$), (d) régimen de spouting (a velocidad más elevada, $5 \cdot u_{ms}$).

4.2.2. Partículas gruesas

En cuanto a las partículas gruesas (vidrio) en contraposición a las finas (arena y serrín) muestran unas diferencias significativas. La Figura 4.4(a), corresponde al régimen de lecho fijo, en el cual se muestra una gran disonancia entre los 100 primeros valores de la frecuencia, sin embargo, se puede observar que el pico de mayor repetitividad se sitúa en torno a un valor de 30 Hz. Una vez iniciado el régimen de spouting (b), aumentan los picos de repetitividad (o DSP) en frecuencias más bajas, proporcionando a dichos valores la frecuencia predominante. A velocidades más altas del aire (c) se produce un aumento de la DSP de las frecuencias más elevadas al mismo tiempo que disminuyen las de las frecuencias más bajas, hecho que se acentúa al seguir aumentando la velocidad y por lo tanto avanzando en el régimen de spouting (d) dando lugar a la predominancia de frecuencias más elevadas (valores próximos a 60 Hz).

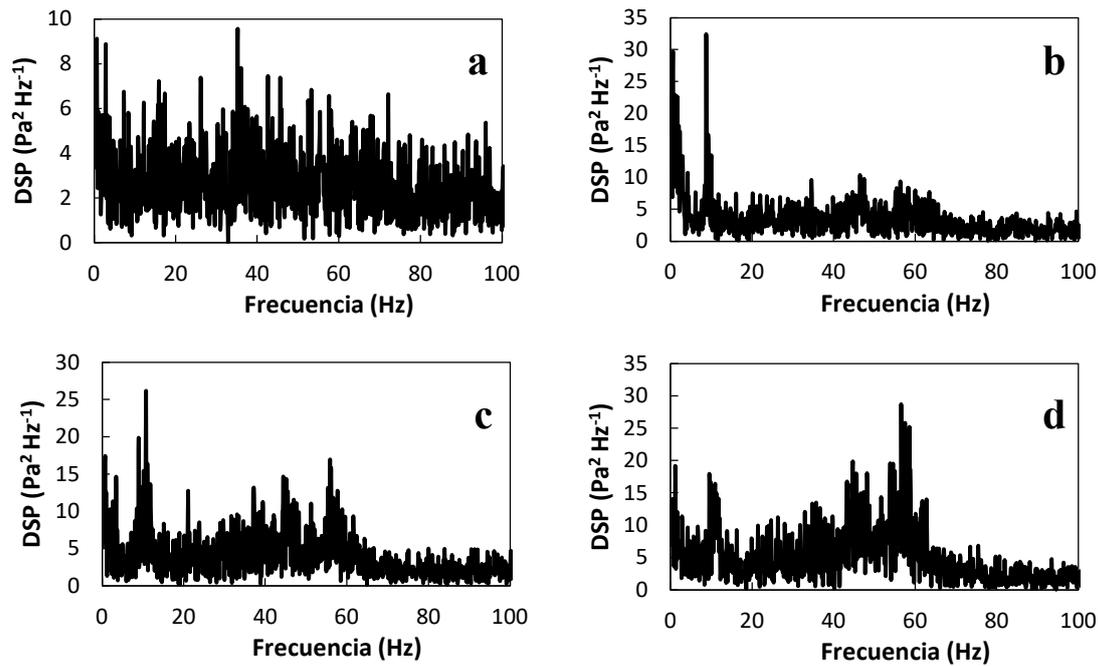


Figura 4.4. Representación para la obtención de la frecuencia predominante con empleo de vidrio a distintas velocidades, (a) régimen de lecho fijo, (b) régimen de spouting (u_{ms}), (c) régimen de spouting (a mayor velocidad, $2 \cdot u_{ms}$), (d) régimen de spouting (a velocidad más elevada, $3 \cdot u_{ms}$).

Como tendencia general, se puede concluir que, por un lado, en los regímenes de lecho fijo, las frecuencias predominantes de los tres sólidos se encuentran en rangos relativamente elevados (en torno a 40-60 Hz) efecto causado por el motor de la soplante principalmente, tal y como se ha explicado anteriormente. Por otro lado, se puede establecer que para partículas finas (arena y serrín), en un amplio rango de velocidades una vez obtenido el régimen de spouting, se obtienen frecuencias predominantes bajas (en torno a 7-11 Hz), que son frecuencias típicas del sistema de contacto gas-sólido que se genera en el spouted bed, a diferencia de las partículas gruesas (vidrio) en las que en regímenes de spouting a elevadas velocidades se obtienen frecuencias elevadas (40-60 Hz), debido a la gran estabilidad del sistema. Por lo que se puede establecer una dependencia entre el diámetro de los sólidos y la frecuencia predominante en elevados regímenes de spouting, esta, ocasiona un aumento de la frecuencia predominante a mayor diámetro de partícula a elevadas velocidades del aire, es decir, a medida que se aumenta la velocidad del gas, las frecuencias más elevadas van tomando mayor relevancia.

Esto es debido a la gran estabilidad obtenida con partículas gruesas a alta velocidad del gas. En esta situación, el sistema opera continuamente y la frecuencia correspondiente a la interacción gas-sólido deja de prevalecer, obteniendo frecuencias dominantes superiores correspondientes al equipo.

4.3. EFECTO DE LA CONFIGURACIÓN

Para observar el efecto de la configuración de los tubos centrales internos sobre los sólidos se van a comparar en unas condiciones constantes: $H_0=0.22$ m, $D_C=0.20$ m, $\gamma=36^\circ$, $D_0=0.04$ m, $D_T=0.04$ m. El resultado de estas condiciones es extrapolable a otros tipos de combinaciones, debido a que el efecto de los tubos centrales internos es el mismo.

En la Figura 4.5 se indica la evolución de la frecuencia con la velocidad del aire con las distintas configuraciones para cada sólido empleado. Con el estudio del empleo sin tubo central interno (Figura 4.5a), se observa una leve disminución de la frecuencia a medida que aumenta la velocidad del gas. Este hecho se manifiesta de forma más pronunciada con la arena y el serrín que con el vidrio.

Con el empleo de un tubo de aberturas (Figura 4.5b), con velocidades situadas en el régimen de spouting, se observa que la frecuencia se mantiene estable en un rango de entre 7-10 Hz. Esto es consecuencia de la estabilidad proporcionada por el tubo central. Sin embargo, en las regiones de lecho fijo las frecuencias se sitúan en magnitud de órdenes más elevadas. A su vez, en el caso de las partículas de vidrio, una vez aumentado la velocidad del gas se produce un aumento en la frecuencia, esto es debido a que se acerca al comienzo del régimen de jet-spouting, el cual provoca un movimiento más vigoroso uniformando la porosidad del lecho (San José, 1991) por lo que el sistema comienza a funcionar de manera más continua y menos en pulsos, por lo que las frecuencias del lecho disminuyen y predominan la del soplante.

En cuanto al empleo de un tubo central interno no poroso (Figura 4.5c), este proporciona estabilidad al sistema, estableciendo un paso preferente del gas a través del lecho, esta estabilidad, se traduce en un aumento de la frecuencia con la velocidad del aire. Siendo este aumento más pronunciado en el serrín, seguido del vidrio y de la arena. Dando a entender que debido a que el serrín es el sólido con mayor dificultad para fluidizar (grupo C en la clasificación de Geldart), consigue mejorar en mayor medida la estabilidad del sistema que con el empleo de arena y vidrio, los cuales fluidizan y estabilizan con mayor facilidad, obteniéndose, por tanto, una menor acentuación en la estabilidad del sistema.

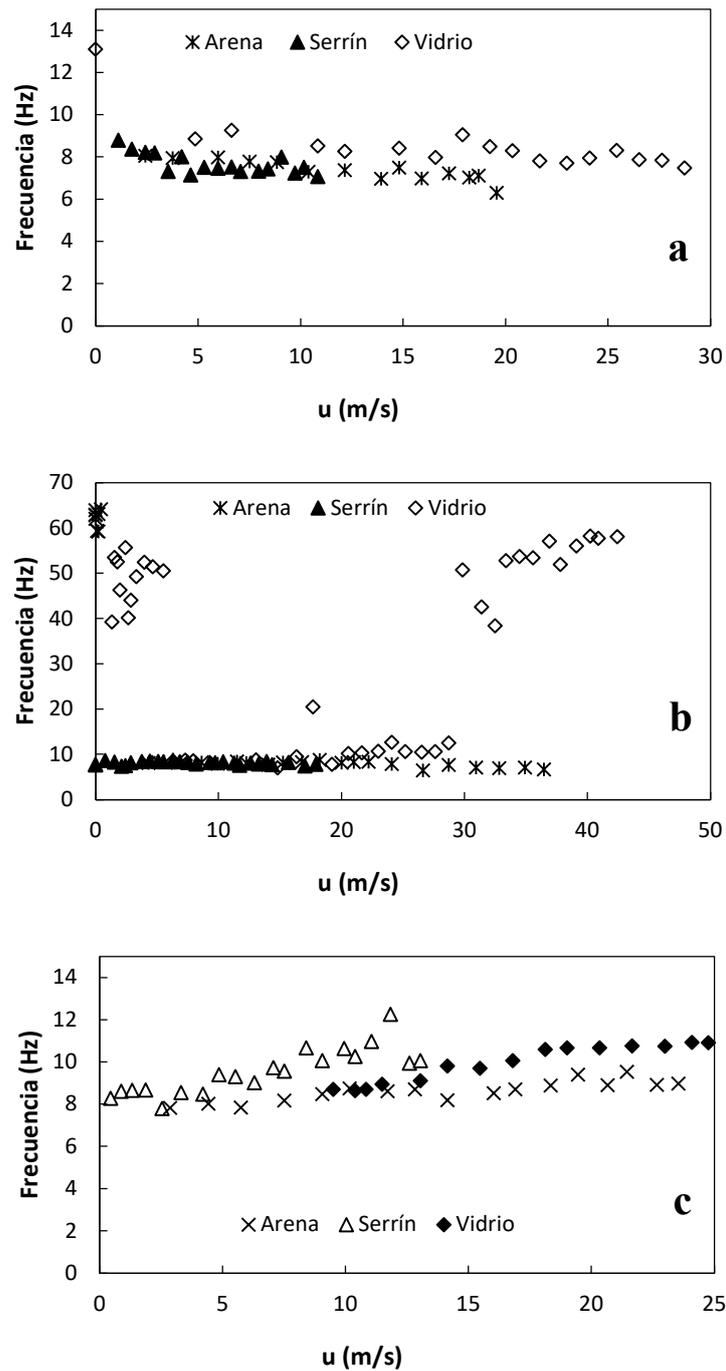


Figura 4.5. Evolución de la frecuencia predominante con la velocidad del aire para las distintas configuraciones del sistema según el tubo central interno, (a) sin tubo, (b) tubo de aberturas, (c) tubo no poroso.

4.4. EFECTO DEL SÓLIDO

La influencia del sólido en el comportamiento de la frecuencia en el sistema se observa en la Figura 4.6.

La acción con arena (Figura 4.6a) produce diferentes resultados en función del tipo de tubo central empleado. Se diferencian dos tendencias significativas. El tubo no poroso, debido a la gran estabilidad que proporciona al sistema, produce un pronunciado aumento en la frecuencia con la velocidad del aire. El tubo central con aberturas, si bien es cierto que también aumenta la estabilidad, lo hace en menor medida, es por ello, que no mantiene la pendiente positiva en la frecuencia, sino que produce una leve tendencia negativa. Esta tendencia negativa, se ve pronunciada con la ausencia del tubo central, hecho previsible debido a la inestabilidad producida por su ausencia.

Con el empleo de serrín (Figura 4.6b) se observa cierta variación en relación con la arena. En primer lugar, la acción del tubo no poroso produce el mismo resultado que con la arena, es decir, produce un aumento en la frecuencia con el aumento de la velocidad del aire. Sin embargo, la utilización tanto del tubo de aberturas como sin él, produce un ligero descenso en la frecuencia con el aumento de la velocidad del gas. Cabe destacar que esta disminución es menos pronunciada que en el caso de la arena. Además, la ausencia de tubo central ocasiona un mayor descenso en la frecuencia llegando a situarse en valores de 7 Hz, respecto a los 8 Hz del tubo central de aberturas.

Las partículas de vidrio (Figura 4.6c) ocasionan las mayores discrepancias en las frecuencias con el uso de los diferentes tubos centrales internos en comparación con los otros sólidos. Este efecto tiene dos tendencias claramente diferenciadas. La primera tendencia está originada por los tubos centrales internos, y la segunda por su ausencia. Esto es, tanto el tubo central no poroso como el de aberturas provocan un aumento pronunciado en la frecuencia a medida que aumenta la velocidad del aire, a diferencia que con la ausencia del tubo central interno en la cual las frecuencias disminuyen de forma escalonada. Este hecho explica que el vidrio sea el sólido con el cual se logre con mayor facilidad la estabilidad del sistema.

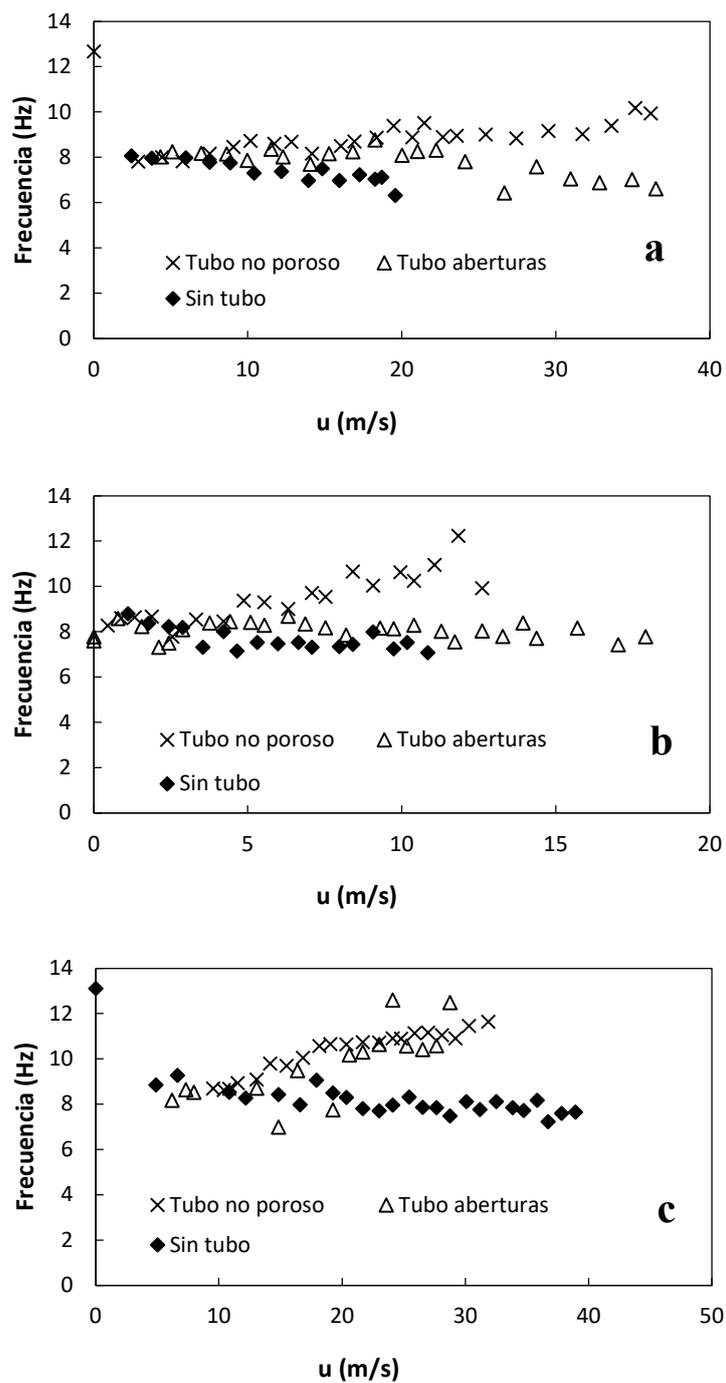


Figura 4.6. Evolución de la frecuencia predominante con la velocidad del aire para los distintos tipos de sólido empleados, (a) arena, (b) serrín, (c) vidrio.

4.5. EFECTOS DE DIFERENTES PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

El comportamiento hidrodinámico del spouted bed se ve influenciado por diferentes parámetros geométricos.

Para el estudio del efecto de los distintos parámetros geométricos (γ , D_0 y H_0) sobre el comportamiento hidrodinámico del sistema se han trabajado con tres tipos de sólidos, sin embargo, únicamente se van a mostrar dos sólidos cuyas características distan más entre ellas. Es decir, vidrio (como partículas gruesas) y serrín (como partículas finas).

4.5.1. Efecto del ángulo del contactor cónico

Para el estudio del efecto de diferentes ángulos del contactor se ha empleado una configuración con tubo central interno de aberturas, debido a que es la configuración que proporciona unos resultados intermedios entre las tres elecciones posibles (TS, TA, ST).

Con objeto de mantener una altura del confinador respecto del lecho (H_F) constante en todos los experimentos, se debe modificar junto con el ángulo del contactor la altura del lecho (H_0).

En la Figura 4.7, en relación a los ángulos de 36 y 45° no se observa gran diferencia en la frecuencia obtenida. Es el de menor ángulo, 28°, el que mayor diferencia ocasiona, ya que su menor inclinación de las paredes del contactor provoca que los sólidos, debido a la fuerza de la gravedad, se encuentren con una menor superficie de sustentación accediendo más rápido a la zona del spout desde la zona anular en cada movimiento cíclico efectuado. Así, con un menor ángulo de contactor, se obtienen mayores frecuencias predominantes.

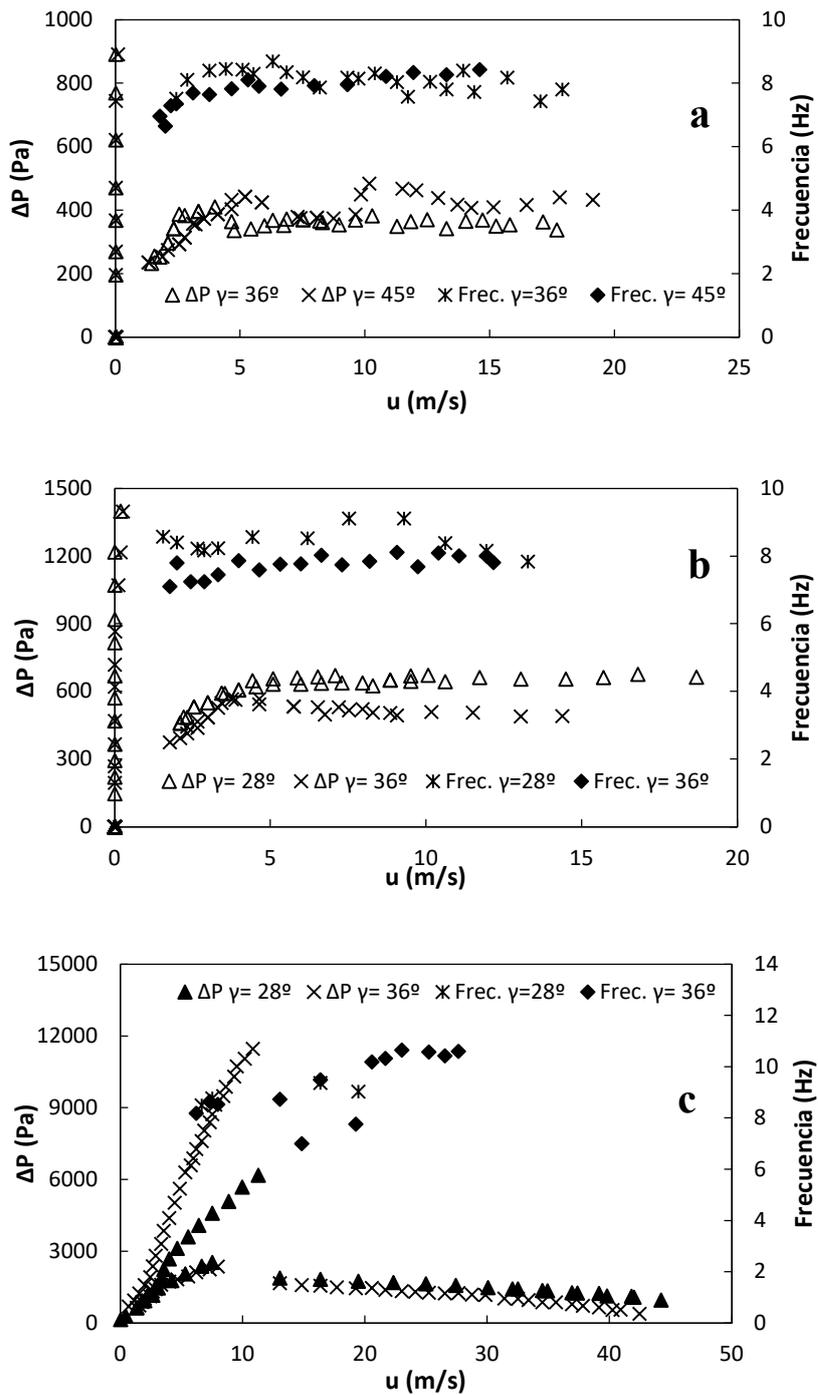


Figura 4.7. Evolución de la caída de presión (eje principal) y la frecuencia predominante (eje secundario) con la velocidad del aire para distintos valores de ángulos del contactor, (a) serrín, (b) serrín, (c) vidrio.

4.5.2. Efecto del diámetro de entrada del aire

En la Figura 4.8 se muestra el efecto del diámetro de entrada del aire (D_0) con distintos sólidos (serrín y vidrio) y configuraciones (TS, ST). Para este estudio, se emplean tres tamaños de diámetro de entrada distintos: 0.03, 0.04 y 0.05 m.

En la Figura 4.8(a) con empleo de serrín y tubo no poroso, las frecuencias con diámetro de entrada de aire de 0.04 m se sitúan entre los valores intermedios de las frecuencias producidas por $D_0=0.03$ y 0.05 m. Este hecho, explica que el diámetro de 0.04 m sea el más utilizado en la bibliografía.

Con empleo del mayor diámetro de entrada del aire ($D_0=0.05$ m), a bajas velocidades (de 0-5 m/s) es el diámetro que menores frecuencias registra, sin embargo, a medida que aumenta la velocidad (de 5 m/s en adelante) los valores de frecuencia aumentan, logrando los valores más elevados. En cambio, con el empleo del menor diámetro de entrada del aire ($D_0=0.03$ m) sucede el efecto contrario.

Estos hechos se explican mediante el denominado “efecto Venturi”. A caudales bajos, cuanto mayor diámetro de entrada del gas ($D_0=0.05$ m), a menor velocidad circula el gas (y mayor presión) ocasionando mayor inestabilidad en el sistema (bajas frecuencias predominantes). Al reducir el D_0 , a 0.03 m, se introduce a mayor velocidad (y menor presión) resultando en un sistema más estable (altas frecuencias predominantes).

En la Figura 4.8 (b) se muestra el sistema con ausencia de tubos centrales internos, en los cuales la frecuencia obtenida posee una tendencia descendente en todas las configuraciones de D_0 .

Debido a que la configuración empleada (sin tubo) es la más inestable, con el aumento del caudal de aire continúa pronunciándose de manera más acentuada la inestabilidad del sistema reflejándose en el hecho de que la frecuencia con la velocidad tiene una pendiente negativa, en el caso de persistir en el aumento de la velocidad, se obtendrá el régimen de slugging y, por tanto, un régimen inestable.

A caudales bajos del gas, el empleo o no del tubo central interno no es de gran importancia, debido a que el gas no es capaz de romper el lecho, sin embargo, a medida que aumenta el caudal adquiere mayor importancia debido a que el gas está en expansión dentro del sistema, distinguiéndose entonces dos situaciones; con tubo no poroso, este, es capaz de direccionar el aire y formar el spout. Mientras que, con ausencia del tubo central, se forman las llamadas burbujas en la región anular.

Por último, en la Figura 4.8 (c) en cuanto el vidrio, continúa la misma tendencia, cuanto mayor sea el D_0 empleado, menor frecuencia del sistema se obtiene y, por ende, mayor inestabilidad. En el caso de $D_0=0.03$ m, se obtienen frecuencias muy dispares situadas en valores elevados, de las cuales no se encuentra un motivo claro, por lo que se requieren más ensayos para aclarar esta tendencia.

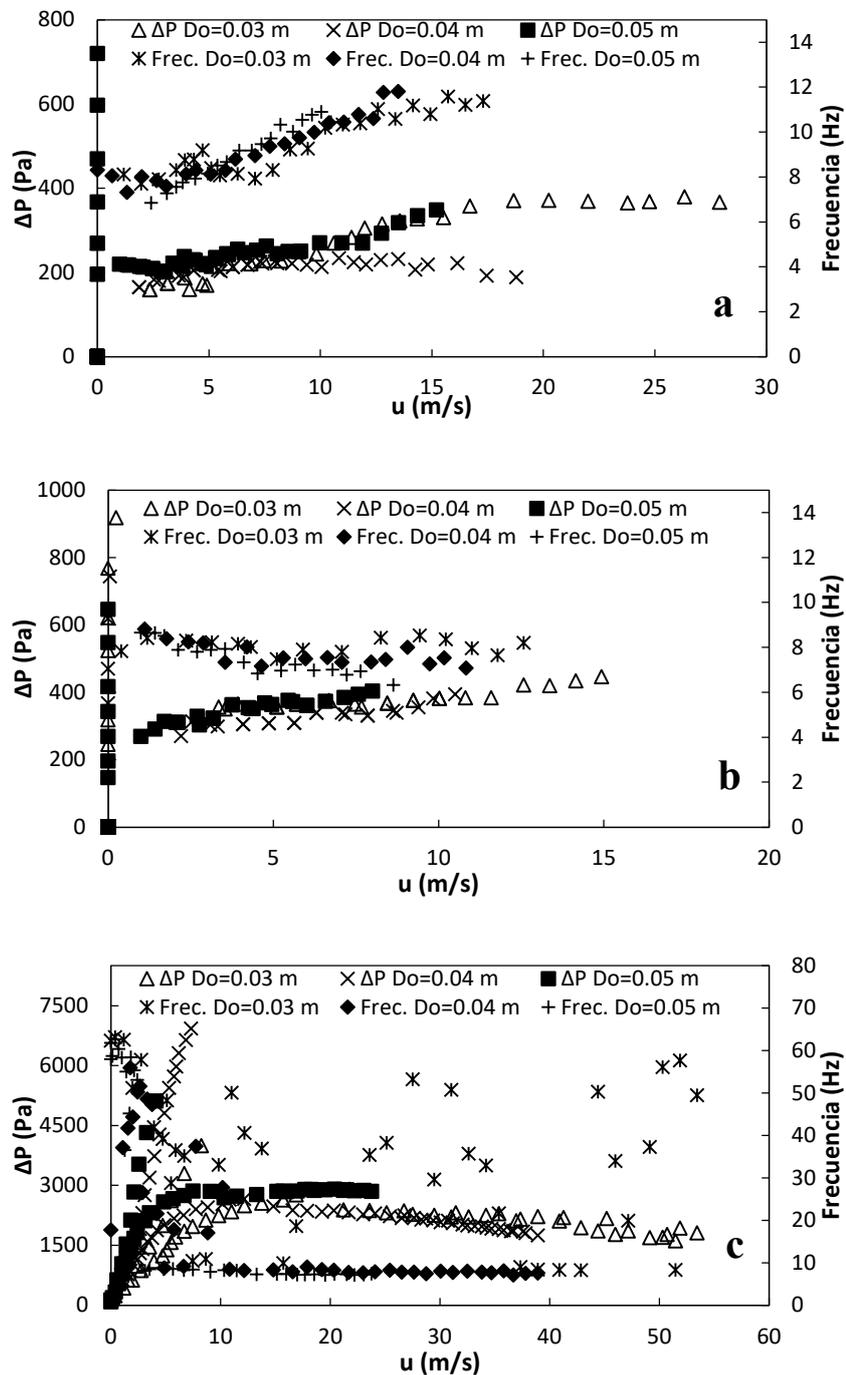


Figura 4.8. Evolución de la caída de presión (eje principal) y la frecuencia predominante (eje secundario) con la velocidad del aire para distintos D_o , (a) serrín, tubo no poroso, (b) serrín, sin tubo, (c) vidrio, sin tubo.

4.5.3. Efecto de la altura del lecho

Para el estudio del efecto de la altura del lecho en la hidrodinámica del sistema, se ha experimentado con tres alturas distintas ($H_0=0.15, 0.22$ y 0.27 m), manteniendo una altura del confinador al lecho constante (H_F) y con un valor positivo de 0.06 m. Esto se debe a que se ha observado que debe mantenerse una H_F determinada para evitar perturbaciones en la superficie del lecho originadas por el gas descendente de la fuente, ocasionando el aumento en la caída de presión, esto principalmente sucede cuando se opera con pequeñas distancias de H_F (Altzibar y cols., 2017).

Cabe destacar que, con empleo de distintas alturas del lecho, se observan distintos sucesos, los cuales se explican a continuación:

Por un lado, con empleo de un alto caudal del aire y una elevada altura del lecho, se obtiene una configuración con una gran masa de sólidos y, por tanto, esta, ejerce mayor presión al aire que se introduce al sistema. Partiendo de esta base, como ya se ha mencionado anteriormente, la forma más común de inestabilidad es la formación de slugging, el cual se manifiesta por la formación de burbujas en el lecho, este fenómeno se inicia en la base del spouted bed y se propaga por todo el lecho. Cuanto mayor presión ejerce el lecho sobre el gas, este, necesita mayor velocidad para su expansión y de este modo provocar el efecto slugging, es por ello que con pequeñas alturas de lecho se obtienen menores frecuencias predominantes debido a la mayor facilidad en la creación del slugging y, por tanto, de la inestabilidad en el contacto gas-sólido.

Por otro lado, con uso de caudales reducidos, a velocidades cercanas a la mínima de spouting, los sistemas con lechos de mayor altura son ligeramente más inestables que los de lechos inferiores, debido al reducido caudal del aire que se introduce se estabiliza en mayor medida el lecho de menor altura.

Estos razonamientos se observan en las Figuras 4.9 (a), (b) y (c), en los casos de arena, vidrio y serrín, respectivamente.

En cuanto a la Figura 4.9 (b), con serrín a distintas H_0 , estas tendencias se muestran más atenuadas, obteniéndose frecuencias más constantes. Cabe mencionar que no se empleó suficiente caudal del gas como para lograr un régimen de slugging debido a la pérdida de material por efecto del arrastre.

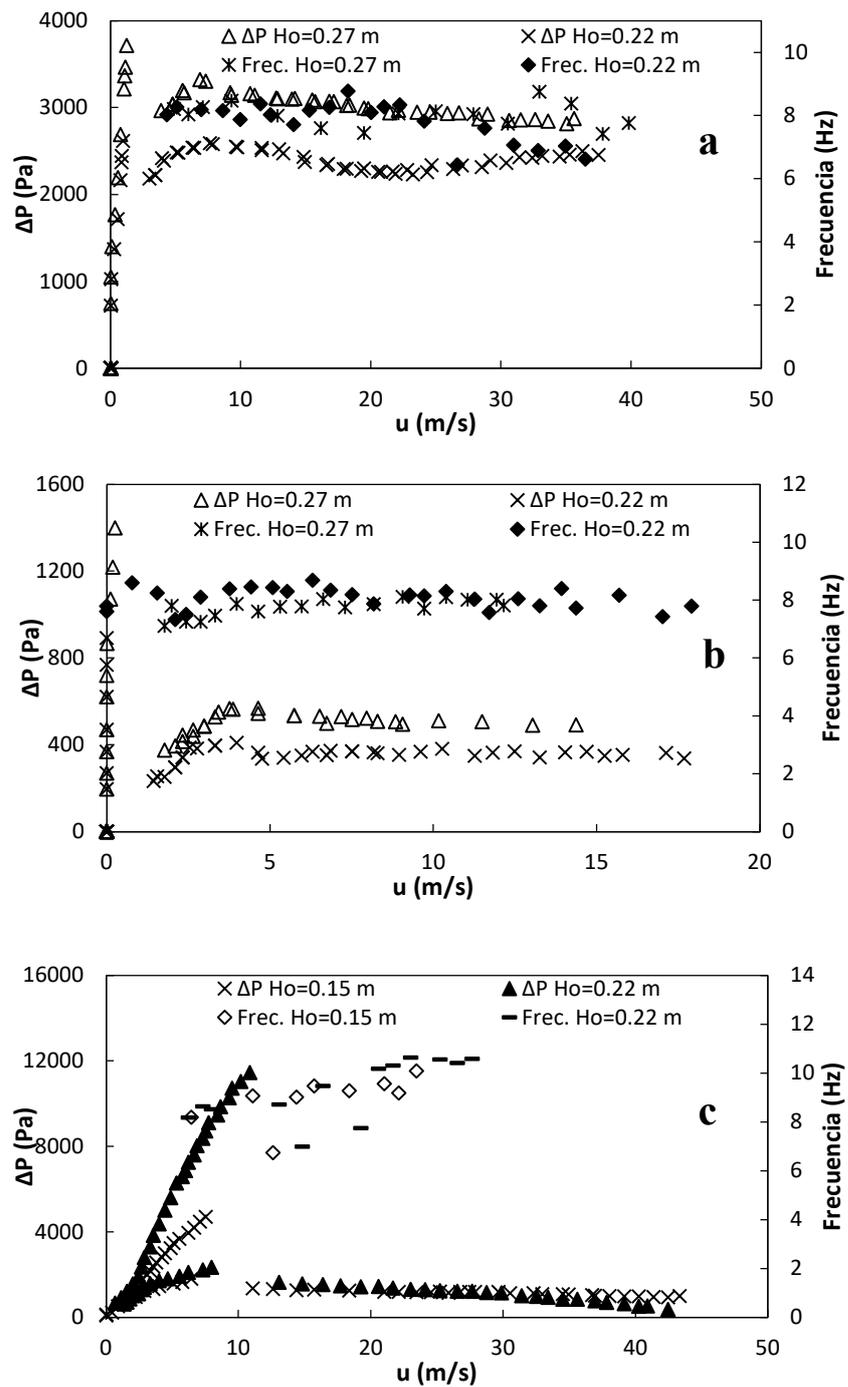


Figura 4.9. Evolución de la caída de presión (eje principal) y la frecuencia predominante (eje secundario) con la velocidad del aire para distintas H_0 , (a) arena, (b) serrín, (c) vidrio.

5. CONCLUSIONES

Tras los resultados obtenidos se establecen las siguientes conclusiones:

1. En cuanto a las frecuencias predominantes del sistema:
 - En términos generales, cabe destacar que cuando se obtienen frecuencias predominantes elevadas, estas, se obtienen en el régimen de lecho fijo, es decir, a velocidades bajas del aire. Esto tiene su explicación en relación al movimiento nulo de los sólidos empacados en el lecho, que, por tanto, no produce frecuencia alguna en el sistema. Los datos registrados en estas condiciones corresponden a la frecuencia de movimiento del motor de la soplante que impulsa el aire.
 - Los resultados ponen de manifiesto que frecuencias altas del sistema corresponden con regímenes estables y viceversa, debido al funcionamiento característico del contacto gas-sólido que ocurre en el spouted bed. En regímenes estables (spouting) el contacto gas-sólido ocurre en el movimiento de forma continua de los sólidos junto con el gas. Sin embargo, con regímenes inestables (slugging) se originan unos pequeños pero reiterativos instantes, provocados por la formación de burbujas de gas, en los cuales este movimiento se detiene produciendo menores oscilaciones en la frecuencia del sistema ocasionando, por tanto, que disminuya la frecuencia predominante en relación al sistema estable.
2. En relación a los modos de operación y tipos de sistemas empleados en el spouted bed:
 - El cambio en el modo de operación del sistema convencional, como es el empleo del confinador de la fuente y del tipo de sistema como es la introducción de tubos centrales internos, corroboran mediante el estudio de la frecuencia originada que no se produce inestabilidad en un amplio rango de caudales de aire con el empleo de partículas del grupo B, C y D de la clasificación de Geldart.
 - La modificación del tipo de sistema; sin tubo, tubo no poroso y tubo de aberturas, ocasiona una variación en la estabilidad del spouted bed. Concretamente, la ausencia de tubo central interno con el aumento de la velocidad del aire tiende a inestabilizar el contacto gas-sólido, provocando una disminución en las frecuencias predominantes siendo esta más notable con sólidos de menor diámetro de partícula. Este hecho, se invierte con el empleo del tubo con aberturas y con el tubo no poroso, siendo este último el que mayor estabilidad proporciona al sistema.
3. Respecto al tipo de sólido empleado:
 - Para lograr un régimen de spouting con sólidos de lechos porosos y esféricos, como el vidrio, es necesaria una mayor velocidad del gas que para partículas con una baja porosidad y un tamaño irregular como son la arena y el serrín. Esto ocurre porque con partículas con las características del vidrio, a medida que se aumenta la velocidad del gas, debido a su elevada porosidad el aire es capaz de percolar más fácilmente por el lecho, produciendo un aumento en la frecuencia del sistema.

4. En relación a los distintos regímenes del sistema:

- Mediante la obtención de las frecuencias predominantes es posible distinguir los regímenes en los que opera el sistema. Esto permite de una forma más simple y económica, el seguimiento y, por tanto, control de las interacciones gas-sólido producidos en el spouted bed. Logrando una implementación a escala industrial más eficiente en relación a otros métodos. En los tres regímenes característicos se encuentran distintas frecuencias predominantes. Inicialmente, en el régimen de lecho fijo, debido al nulo movimiento del lecho el sistema tiene una frecuencia en torno a cero, la cual es superpuesta por una frecuencia predominante elevada debido a los equipos involucrados en el sistema (como la soplante del aire). A continuación, en el régimen de spouting, debido a las interacciones más estables y continuas dentro del sistema entre los sólidos y el fluido, se obtienen rangos de frecuencias predominantes en torno a 7-15 Hz. Por último, en el régimen de slugging se logran frecuencias inferiores debido a la inestabilidad surgida en las interacciones sólido-fluido.

6. NOMENCLATURA

D_0	Diámetro de entrada del gas, m
D_C	Diámetro del contactor, m
D_F	Diámetro del confinador, m
DSP	Densidad espectral de potencia, $\text{Pa}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$
d_p	Diámetro de partícula, m
D_T	Diámetro del tubo central interno, m
f	frecuencia, Hz
$F(f)$	Señal en el dominio de la frecuencia
H_0	Altura del lecho, m
H_F	Altura del confinador respecto del lecho, m
H_f	Altura de la fuente, m
L_F	Longitud del confinador, m
L_H	Altura de las patas del tubo central interno, m
L_T	Altura del tubo central interno, m
m	Masa, kg
PA	Relación de abertura del tubo central interno, %
Q	Caudal del aire, $\text{m}^3\text{N/h}$
ST	Sistema sin tubo central interno
t	tiempo, s
TA	Sistema con tubo central interno con aberturas
TS	Sistema con tubo central interno no poroso
u	Velocidad del aire, m/s
u_{bs}	Velocidad de slugging, m/s
u_{fs}	Velocidad de spouting completo, m/s
u_{ms}	Velocidad mínima de spouting, m/s

u_{sf} Velocidad de aumento de presión, m/s

V Volumen, m^3

$x(t)$ Señal en el dominio del tiempo

SÍMBOLOS GRIEGOS

ΔP Pérdida de carga, Pa

ρ_g Densidad del gas, kg/m^3

ρ_s Densidad de la partícula, kg/m^3

γ Ángulo del contacto cónico, °

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguado, R., 1999. Combustión y pirólisis de residuos de madera en spouted bed cónico, 350.
- Altzibar, H., Estiati, I., Lopez, G., Saldarriaga, J. F., Aguado, R., Bilbao, J., & Olazar, M., 2017. Fountain confined conical spouted beds. *Powder Technology*, 312, 334–346.
- Altzibar, H., Lopez, G., Estiati, I., Bilbao, J., & Olazar, M. 2013. Particle cycle times and solid circulation rates in conical spouted beds with draft tubes of different configuration. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(45), 15959–15967.
- Cook, H. H., & Bridgwater, J., 1985. Particle residence times in the continuous spouting of mixtures. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 63(2), 326–331.
- Epstein, N., & Grace, J. R., 2010. Spouted and spout-fluid beds: Fundamentals and applications.
- Epstein, Norman, & Grace, J. R., 1997. Spouting of Particulate Solids. *Handbook of Powder Science & Technology*, 532–567.
- Geldart, D., 1973. Types of gas fluidization. *Powder Technology*, 7(5), 285–292.
- José, M. J. S., Olazar, M., Llamosas, R., Izquierdo, M. A., & Bilbao, J., 1996. Study of dead zone and spout diameter in shallow spouted beds of cylindrical geometry. *Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, 64(3), 353–359.
- Mathur, K. B., & Epstein, N., 1974. Dynamics of Spouted Beds (Vol. 9, Issue C).
- Mostoufi, N., Kulah, G., & Koksai, M., 2015. Flow structure characterization in conical spouted beds using pressure fluctuation signals. *Powder Technology*, 269, 392–400.
- Olazar, M., Arandes, J. M., Zabala, G., Aguayo, A. T., Bilbao, J., 1997. Design and operation of a catalytic polymerization reactor in a dilute spouted bed regime. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 1637–1643.
- Olazar, M, José, M. J. S., Aguayo, A. T., Arandes, J. M., & Bilbao, J., 1992. Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 31(7), 1784–1792.
- Olazar, M, José, M. J. S., Peñas, F. J., Aguayo, A. T., & Bilbao, J., 1993. Stability and Hydrodynamics of Conical Spouted Beds with Binary Mixtures. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 32(11), 2826–2834.
- Olazar, Martin, San José, M. J., Aguayo, A. T., Arandes, J. M., & Bilbao, J., 1992. Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 31(7), 1784–1792.
- Olazar, Martín, San José, M. J., Alvarez, S., Morales, A., & Bilbao, J., 2004. Design of Conical Spouted Beds for the Handling of Low-Density Solids. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 43(2), 655–661.
- Pablos., A., 2017. Diseño de un contactor spouted bed para el secado de arenas finas y

ultrafinas. Univesidad del País Vasco, EHU/UPV.

- Pablos, A., Aguado, R., Tellabide, M., Altzibar, H., Freire, F. B., Bilbao, J., & Olazar, M., 2018. A new fountain confinement device for fluidizing fine and ultrafine sands in conical spouted beds. *Powder Technology*, 328, 38–46.
- Piskova, E., & Mörl, L., 2008. Characterization of spouted bed regimes using pressure fluctuation signals. *Chemical Engineering Science*, 63(9), 2307–2316.
- San José, M.J., Alvarez, S., Ortiz de Salazar, A., Olazar, M., Bilbao, J., 2005. Influence of the particle diameter and density in the gas velocity in jet spouted beds. *Chemical Engineering and Processing*, 44, 153–157.
- San José, M. J., 1991. Regímenes de operación en spouted beds cónicos. Condiciones de estabilidad y fluidodinámica. *Tesis Doctoral*.
- Tellabide, M., Estiati, I., Pablos, A., Altzibar, H., R. Aguado, M. O., 2020. New operation regimes in fountain confined conical spouted beds. *Chemical Engineering Science*, 211.
- Xu, J., Bao, X., Wei, W., Shi, G., Shen, S., Bi, H. T., Grace, J. R., & Lim, C. J., 2004. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds. *Powder Technology*, 140(1–2), 141–154.