



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

ÁREA DE INGENIERÍA TÉRMICA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE
UN LECHO FLUIDIZADO**

AUTOR:

VÍCTOR MANUEL BARREIRA MORENO

TUTORA:

CELIA SOBRINO FERNÁNDEZ

ABRIL 2007

ÍNDICE

NOMENCLATURA	5
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Objetivo del estudio	8
1.2. Alcance del estudio	9
1.3. Estructura de la memoria	10
2. CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN	11
2.1. El fenómeno de fluidización	12
2.2. Comportamiento fluido de un lecho fluidizado	16
2.3. Calidad de fluidización	18
2.4. Propiedades de las partículas de fluidización	18
2.5. Clasificación de las partículas de fluidización	19
2.6. Formación de burbujas durante la fluidización	21
2.7. Ventajas y desventajas de aplicación de los lechos fluidizados	22
2.8. Aplicaciones industriales de la fluidización	23
2.8.1. Operaciones físicas	23
2.8.1.1. Intercambio de calor	23
2.8.1.2. Recubrimiento de objetos metálicos	24
2.8.1.3. Adsorción	25
2.8.1.4. Secado de sólidos	25
2.8.2. Reacciones de síntesis	27
2.8.3. Craqueo de hidrocarburos	28
2.8.3.1. Craqueo catalítico fluido	28
2.8.3.2. Craqueo térmico	30
2.8.4. Combustión	30
2.8.4.1. Combustión de carbón	30
2.8.4.2. Incineración de residuos sólidos	32
2.8.5. Gasificación	33
2.8.5.1. Gasificación de carbón	33
2.8.5.2. Gasificación de residuos sólidos	34
2.8.6. Activación de carbón	34

2.8.7.	Calcinación	35
2.8.8.	Reacciones con sólidos	36
2.8.9.	Biofluidización	37
3.	MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA	39
3.1.	Fundamentos hidrodinámicos de la fluidización	40
3.2.	Cálculo teórico de la velocidad de mínima fluidización	42
3.3.	Cálculo experimental de la velocidad de mínima fluidización a partir de la pérdida de carga en el lecho	43
3.4.	Cálculo experimental de la velocidad de mínima fluidización a partir de las fluctuaciones de presión en el lecho	45
4.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN	48
4.1.	Descripción del lecho	50
4.2.	Descripción de las partículas de fluidización	52
4.3.	Descripción de los sensores y transductores de presión	53
4.3.1.	Consideraciones generales sobre transductores de presión	54
4.3.2.	Transductores de presión empleados	54
4.4.	Descripción del sistema de adquisición de datos	57
4.4.1.	Consideraciones generales sobre tarjetas de adquisición de datos	57
4.4.2.	Tarjeta de adquisición de datos empleada	58
4.4.3.	Configuración del sistema de adquisición de datos	59
5.	MEDIDAS Y CÁLCULOS	61
5.1.	Características de las medidas	62
5.2.	La adquisición de los datos	64
5.2.1.	Estructura del programa de adquisición de datos	64
5.2.2.	Implementación del programa de adquisición de datos	66
5.3.	Aplicación de los métodos de cálculo experimentales	69
5.4.	Aplicación del método de cálculo teórico	72
6.	RESULTADOS	74
6.1.	Tamaño de la muestra	75
6.2.	Pérdida de carga en el distribuidor	76
6.3.	Aparición de slugging	78

6.4.	Velocidad de mínima fluidización	79
6.4.1.	Influencia de la posición del sensor sobre la velocidad de mínima fluidización	80
6.4.2.	Influencia de las propiedades de las partículas sobre la velocidad de mínima fluidización	83
6.4.3.	Influencia de la altura de lecho fijo sobre la velocidad de mínima fluidización	85
7.	CONCLUSIONES	88
7.1.	Cálculo experimental de la velocidad de mínima fluidización	89
7.2.	Influencia de la posición axial del sensor	89
7.3.	Influencia de las propiedades de las partículas	90
7.4.	Influencia de la altura de lecho fijo	90
7.5.	Estudios posteriores	91
ANEXOS		
A.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN	92
A.1.	Planos de la estructura del lecho	93
A.2.	Tamaño de las partículas	100
A.3.	Densidad de las partículas	102
B.	MEDIDAS Y CÁLCULOS	103
B.1.	Aplicación de los métodos de cálculo experimentales	104
B.2.	Aplicación del método de cálculo teórico	108
C.	RESULTADOS: VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN	109
C.1.	Partículas de arena, $L = 0.150$ m ($L/D = 1$)	110
C.2.	Partículas de arena, $L = 0.225$ m ($L/D = 1.5$)	112
C.3.	Microesferas de vidrio, $L = 0.150$ m ($L/D = 1$)	113
C.4.	Microesferas de vidrio, $L = 0.225$ m ($L/D = 1.5$)	115
BIBLIOGRAFÍA		117

NOMENCLATURA

a	Ordenada en el origen de la recta de presión – velocidad (Pa)
b	Pendiente de la recta de presión – velocidad ($\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$)
A	Sección transversal del lecho (m^2)
Ar	Número adimensional de Arquímedes ()
D	Diámetro interior de la columna del lecho (m)
d_b	Diámetro de una burbuja en fluidización burbujeante (m)
d_p	Diámetro de una partícula (m)
\bar{E}	Energía mecánica media de las partículas del lecho (J)
E^*	Energía debida a las irregularidades en el lecho de partículas (J)
Err	Error relativo entre un valor obtenido experimentalmente y el valor exacto (%)
g	Aceleración de la gravedad: $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$
H	Altura de la columna del lecho (m)
K_1	Parámetro de proporcionalidad entre \bar{E} y U ($\text{kg}\cdot\text{m/s}$)
K_2	Parámetro de proporcionalidad entre E^* y σ_p (m^3)
L	Altura del lecho de partículas en estado fijo (m)
m_p	Masa de una partícula (kg)
m_b	Masa del lecho de partículas (kg)
p	Presión instantánea (Pa)
\bar{p}	Presión media en una serie (Pa)
N	Número de muestras en una serie ()
Δp	Pérdida de carga entre dos puntos (Pa)
Δp_d	Pérdida de carga a través del distribuidor del lecho (Pa)
Q	Caudal de fluido (m^3/s)
R	Coefficiente de correlación entre dos variables con dependencia lineal ()
Re	Número adimensional de Reynolds relativo a una partícula en el lecho fijo ()
Re_{mf}	Número adimensional de Reynolds al comienzo de la fluidización ()
U	Velocidad superficial del fluido (m/s)
U_{br}	Velocidad de ascenso de las burbujas en un lecho con fluidización burbujeante (m/s)
U_{mb}	Velocidad de mínimo burbujeo (m/s)

U_{mf}	Velocidad de mínima fluidización (m/s)
V	Señal de tensión (V)
V_{ap}	Volumen aparente del lecho de partículas (m^3)
V_h	Volumen hidrodinámico de una partícula (m^3)
z	Altura de un punto sobre el distribuidor (m)

Letras griegas

ε	Fracción de vacío del lecho de partículas en estado fijo ()
ε_{mf}	Fracción de vacío del lecho de partículas al comienzo de la fluidización ()
μ_g	Viscosidad dinámica del gas fluidizante (kg/s·m)
ρ_{abs}	Densidad absoluta de una partícula (kg/m^3)
ρ_g	Densidad del gas fluidizante (kg/m^3)
ρ_b	Densidad aparente del lecho de partículas (kg/m^3)
ρ_p	Densidad de una partícula (kg/m^3)
σ_p	Desviación típica de las fluctuaciones de presión (Pa)

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La fluidización es un fenómeno que cuenta con gran experiencia dentro de la ingeniería. Su primera aplicación de importancia a nivel industrial tiene lugar a comienzos de los años 1940s, con los procesos de craqueo catalítico y, desde entonces, se ha empleado en muchas otras áreas. A lo largo de su historia, la fluidización ha aunado los esfuerzos de múltiples investigadores, de manera que son muchos los estudios que se han publicado sobre el tema. Pero la investigación no ha sido tarea fácil, resultando en ocasiones complicado establecer teorías y correlaciones uniformes. Muchos de los estudios se han hecho en instalaciones de pequeña escala, de comportamiento no siempre posible de extrapolar a las de gran tamaño, por lo que el diseño de las aplicaciones industriales ha requerido un cuidadoso escalado y minuciosas pruebas previas a la puesta en marcha.

En relación con el comportamiento de los lechos fluidizados, se han desarrollado diversos métodos, muchos de ellos basados en el estudio de la pérdida de carga en el lecho, la velocidad de ascenso de las burbujas, la fracción de vacío o las fluctuaciones de presión medidas durante el proceso. Además, se han propuesto otras técnicas más sofisticadas que se apoyan en el uso de sensores ópticos, rayos láser o tomografía.

El método de la pérdida de carga ha sido el referente en los estudios de caracterización hidrodinámica de los lechos fluidizados, habiéndose propuesto correlaciones de gran relevancia. La ejecución práctica del método es sencilla y reporta resultados de elevada fiabilidad.

El método de las fluctuaciones de presión fue propuesto posteriormente. Es de gran popularidad puesto que es simple y fácil de implementar en aplicaciones industriales. Además, contiene suficiente información para caracterizar el comportamiento del lecho fluidizado y se ha demostrado de gran validez. Este método se ramifica en dos modos de análisis: uno que utiliza herramientas lineales, en el dominio del tiempo (desviación típica) y en el dominio de la frecuencia (función de densidad de potencia espectral); y otro que utiliza herramientas no lineales asumiendo el comportamiento de un lecho fluidizado como de carácter caótico.

1.1. Objetivo del estudio

El principal objetivo de este estudio es analizar el comportamiento hidrodinámico de un lecho fluidizado a partir de un parámetro característico, la velocidad de mínima fluidización. Como su propio nombre indica, este parámetro se refiere a la velocidad superficial del gas fluidizante a la que el lecho de partículas comienza a fluidizar. El conocimiento de su valor es importante por diversas razones que se enuncian a continuación:

- Una velocidad del gas por debajo de la velocidad de mínima fluidización supone no alcanzar las ventajas relativas al fenómeno, por lo que la operación carece de validez.
- Un aumento en la velocidad del gas por encima de la velocidad de mínima fluidización provoca cambios en el régimen de operación; la elección del régimen al que se va a operar varía según la aplicación en concreto. Además, un aumento

excesivo de la velocidad del gas puede resultar en el arrastre de partículas del lecho, algo negativo en ciertos procesos industriales.

- La fluidización de un lecho de partículas implica la necesidad de aportar elevados caudales de fluido durante la operación. Conociendo la velocidad de mínima fluidización es posible dimensionar con acierto la instalación de suministro (equipo de impulsión, válvulas, tuberías, etc.). Además, ajustándose este valor se optimiza el consumo energético asociado al suministro del fluido de entrada.

En definitiva, la idea es obtener el valor de la velocidad de mínima fluidización en un lecho de pequeña escala fluidizado mediante aire. Para ello se emplean dos de los varios métodos experimentales planteados en los diferentes estudios que se han realizado sobre fluidización: el método de la pérdida de carga en el lecho y el método de la desviación típica de las fluctuaciones de presión (análisis lineal en el dominio del tiempo). En relación con este último método, se observa además el acierto logrado al tomar medidas en diferentes alturas sobre una misma dirección en la pared del lecho

Asimismo, se pretende estudiar la influencia de las propiedades de las partículas y la altura de llenado del lecho sobre la velocidad de mínima fluidización. De este modo, se lleva a cabo el ensayo con dos tipos de partículas (arena de sílice y microesferas de vidrio) y para dos alturas de llenado del lecho (altura igual al diámetro del lecho y altura igual a 1.5 veces el diámetro).

1.2. Alcance del estudio

La aplicación de los dos métodos de cálculo experimentales mencionados implica la necesidad de realizar medidas de presión en el lecho. Para caracterizar de forma adecuada el comportamiento es necesario tomar series temporales. La reproducción del fenómeno físico será más acertada cuanto mayor sea la frecuencia de la medida, por lo que resulta imprescindible el uso de un ordenador personal. La señal física de presión se ha de adquirir y transformar en una señal procesable por el ordenador. Para ello se emplea un conjunto de transductores de presión, que transforman la señal física en una señal eléctrica analógica, y una tarjeta de adquisición de datos, que convierte la señal eléctrica analógica en eléctrica digital y la introduce en el ordenador.

El desarrollo del estudio supone implementar el sistema de adquisición de datos, desde los sensores y transductores de presión hasta la tarjeta de adquisición, además del programa informático que permita obtener los datos. Adquiridos los datos, se aplican los métodos de cálculo planteados con el fin de obtener los resultados de interés. El ensayo se repite para dos tipos diferentes de partículas y a dos alturas distintas de llenado del lecho, analizando la influencia que estas variaciones puedan tener sobre la velocidad de mínima fluidización. Además, se toman medidas en diferentes alturas sobre la pared del lecho, con el fin de observar la influencia del punto de medida sobre los resultados obtenidos.

Los términos clave del estudio son: velocidad de mínima fluidización, pérdida de carga en el lecho, fluctuaciones de presión, influencia del punto de medida, influencia de las propiedades de las partículas e influencia de la altura de llenado del lecho.

1.3. Estructura de la memoria

La memoria del estudio se distribuye en seis capítulos, aparte de este capítulo de introducción, que se estructuran del siguiente modo:

- Capítulo 2. Describe de forma somera el fenómeno de fluidización, sus principales características, los modos en que puede aparecer y algunas de las diferentes aplicaciones que ha encontrado en la industria.
- Capítulo 3. En él se introducen los principios del comportamiento hidrodinámico de los lechos fluidizados, planteando los diferentes métodos de cálculo de la velocidad de mínima fluidización empleados en este estudio.
- Capítulo 4. Detalla los distintos elementos que componen la instalación donde se lleva a cabo el ensayo. Se describe el lecho, las partículas de fluidización, los sensores y transductores para tomar las medidas y el sistema de adquisición de datos.
- Capítulo 5. Comienza narrando distintos aspectos relacionados con el desarrollo de las medidas, como las condiciones en que se realiza el ensayo, el tamaño de las series o la manera en que se colocan los sensores y transductores. Además, habla del modo en que se lleva a cabo el proceso de adquisición de datos y la aplicación de los métodos planteados en el Capítulo 3 para la obtención de los resultados.
- Capítulo 6. Incluye los resultados del ensayo, hallados según el planteamiento descrito en el Capítulo 5. Se analiza la influencia sobre la velocidad de mínima fluidización de tres aspectos diferentes: la posición axial del punto de medida, las propiedades de las partículas y la altura de llenado del lecho.
- Capítulo 7. En este capítulo se plantean las diferentes conclusiones que resultan de la realización del ensayo.

Además existen tres apartados Anexos: el Anexo A, relacionado con el Capítulo 4, de descripción de la instalación; el Anexo B, ligado al Capítulo 5, sobre la aplicación de los métodos de cálculo de la velocidad de mínima fluidización; y el Anexo C, relacionado con el Capítulo 6, sobre los resultados de velocidad de mínima fluidización.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

2. CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

En este capítulo se lleva a cabo una breve introducción al fenómeno de fluidización, definiendo las principales características de su comportamiento así como los diferentes estados en que puede presentarse. Asimismo, se habla de cómo influyen las propiedades de las partículas sometidas a fluidización y de la formación de burbujas en el lecho, que tiene lugar en muchas de las aplicaciones y es la base de varios estudios de caracterización hidrodinámica. Se comentan también diversos aspectos favorables y desfavorables de la fluidización y, además, ciertos factores que pueden afectar a su calidad. Finalmente, se describen algunas aplicaciones de la fluidización en distintos sectores de la industria.

2.1. El fenómeno de fluidización

La fluidización es el fenómeno por el cual un lecho de partículas sólidas se suspenden en el seno de un gas o un líquido, adquiriendo un comportamiento semejante al de un fluido.

Si un fluido en movimiento ascendente a baja velocidad atraviesa un lecho de finas partículas, en principio el fluido se filtra a través de los espacios entre éstas, que permanecen estacionarias; este estado se denomina de lecho fijo (Figura 2.1(a)). Con un incremento en la velocidad del fluido, las partículas se mueven de forma independiente por medio de pequeñas vibraciones.

Si se sigue aumentando la velocidad, se alcanza un punto donde todas las partículas se encuentran suspendidas por el flujo ascendente de gas o líquido. En este punto la fuerza de fricción entre el fluido y las partículas se equilibra con el peso de éstas, desapareciendo entonces la componente vertical de la fuerza de compresión entre partículas adyacentes. De este modo, la pérdida de carga a través de un volumen determinado de lecho es igual al peso de las partículas existentes por unidad de área. Este estado se denomina de lecho en comienzo de fluidización (Figura 2.1(b)) y marca la transición entre el lecho fijo y el lecho plenamente fluidizado. La velocidad superficial del fluido en este punto se denomina velocidad de mínima fluidización, U_{mf} .

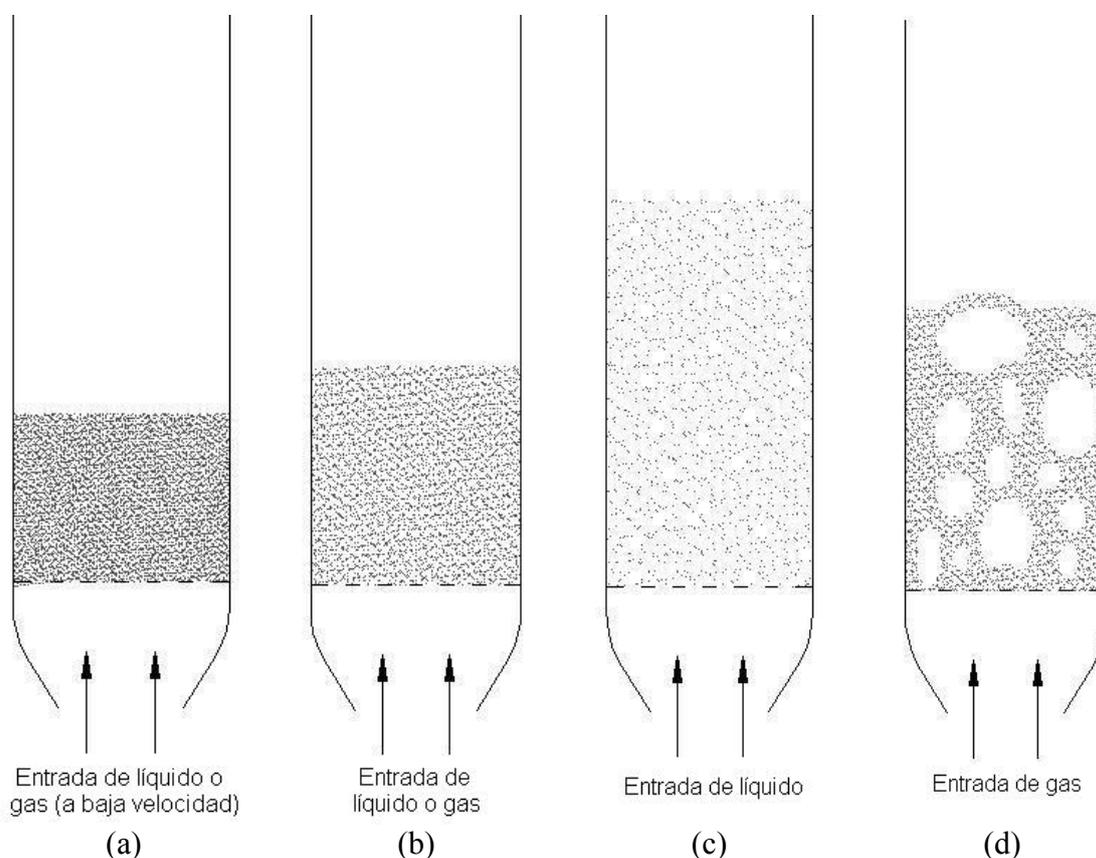
En sistemas fluidizados por líquido, un incremento en la velocidad por encima de la correspondiente a la mínima fluidización, normalmente da lugar a una suave y progresiva expansión del lecho. Las posibles inestabilidades provocadas por un flujo irregular se amortiguan y, en condiciones normales, no se observan heterogeneidades ni formación de burbujas en el lecho. Un lecho con estas características se denomina de fluidización particulada, no burbujeante u homogénea (Figura 2.1(c)). En sistemas fluidizados por gas resulta poco frecuente observar este comportamiento de fluidización homogénea, teniendo lugar sólo en ciertos casos de partículas muy ligeras con gas denso a alta presión.

Generalmente, el comportamiento de los sistemas fluidizados por gas es bastante diferente. Así, al producirse un incremento en la velocidad del gas por encima de la correspondiente a la mínima fluidización, se observan grandes inestabilidades con aparición de burbujas y canales. A mayores velocidades, la agitación pasa a ser más violenta y el movimiento de las partículas más vigoroso; además, el lecho no se expande

mucho más de su volumen de mínima fluidización. Un lecho con este comportamiento se denomina de fluidización agregativa, burbujeante o heterogénea (Figura 2.1(d)). En ocasiones concretas, los sistemas fluidizados por líquido también se comportan como lechos burbujeantes; tal es el caso de sólidos muy densos fluidizados por líquidos de baja densidad.

Los lechos fluidizados tanto por líquido como por gas se consideran lechos fluidizados de fase densa, puesto que existe un límite superior que define con claridad la superficie del lecho de partículas.

En sistemas fluidizados por gas, a velocidades por encima de la de mínima fluidización, se produce la coalescencia de burbujas de gas y crecimiento de éstas a medida que ascienden por el lecho. En ocasiones, en lechos de elevada longitud y pequeño diámetro, las burbujas pueden llegar a ser lo suficientemente grandes como para extenderse a lo ancho del depósito. Se produce entonces lo que se conoce como fenómeno de slugging, caracterizado por la aparición de burbujas de diámetro próximo al del depósito, denominadas slugs. El slugging puede ser de dos tipos, dependiendo del tamaño de las partículas del lecho. En el caso de partículas más finas, éstas caen suavemente hacia abajo por la pared que rodea las burbujas, dando lugar a burbujas de tamaño elevado; el fenómeno se conoce con el nombre de slugging con slugs axiales (Figura 2.1(e)). Para partículas de mayor grosor, la fracción de lecho por encima de las burbujas es empujada aguas arriba, como si lo hiciera un pistón. Las partículas caen desde el slug, que finalmente se desintegra. A partir de dicho instante aparece un nuevo slug, repitiéndose continuamente este movimiento inestable. El comportamiento se llama slugging con slugs de pared (Figura 2.1(f)). El fenómeno de slugging se debe tener especialmente en cuenta en el diseño de lechos fluidizados largos y estrechos.



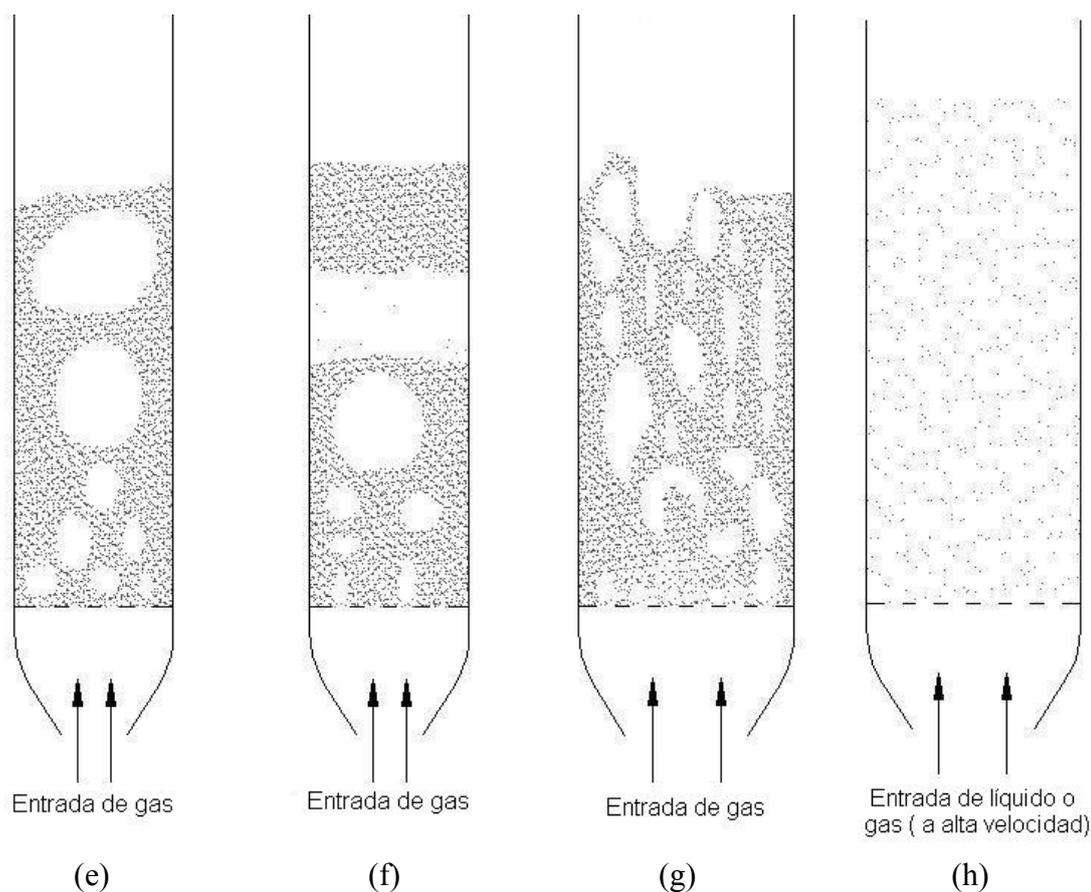


Figura 2.1. Distintos modos de contacto entre el lecho de partículas y el fluido [1]:
 (a) Lecho fijo; (b) Lecho en comienzo de fluidización; (c) Lecho con fluidización no burbujeante; (d) Lecho con fluidización burbujeante; (e) Slugging con slugs axiales; (f) Slugging con slugs de pared; (g) Fluidización turbulenta; (h) Fluidización en fase dispersa con transporte neumático de partículas.

En la fluidización de partículas finas a una velocidad del gas suficientemente alta, se supera el valor de la velocidad terminal de los sólidos. En este momento, el arrastre de partículas llega a ser apreciable con lo que desaparece la superficie superior del lecho y, en lugar de burbujas, se observa un movimiento turbulento de grupos de sólidos y espacios de gas de varios tamaños y formas. Este estado se denomina de lecho fluidizado turbulento (Figura 2.1(g)). Con un aumento en la velocidad del gas aún mayor, las partículas abandonan el lecho con el gas; en este caso se tiene un lecho fluidizado de fase dispersa con transporte neumático de partículas (Figura 2.1(h)).

Tanto en la fluidización turbulenta como en la de fase dispersa se arrastran grandes cantidades de partículas, que es necesario recuperar y devolver al lecho. Esto se lleva a cabo con la ayuda de ciclones, que son elementos de sedimentación por fuerza centrífuga. En general, los sistemas que emplean ciclones para la recuperación de partículas se conocen con el nombre de lechos fluidizados circulantes. En los lechos fluidizados turbulentos con arrastre moderado de partículas se utilizan ciclones internos (Figura 2.2(a)). En los lechos fluidizados de fase dispersa, donde el arrastre de partículas es mayor, normalmente se emplean grandes ciclones fuera del lecho (Figura 2.2(b)). En general, en los lechos fluidizados circulantes es crucial, para desarrollar

correctamente las operaciones, que la recirculación de las partículas a través de los elementos de retención sea suave y uniforme.

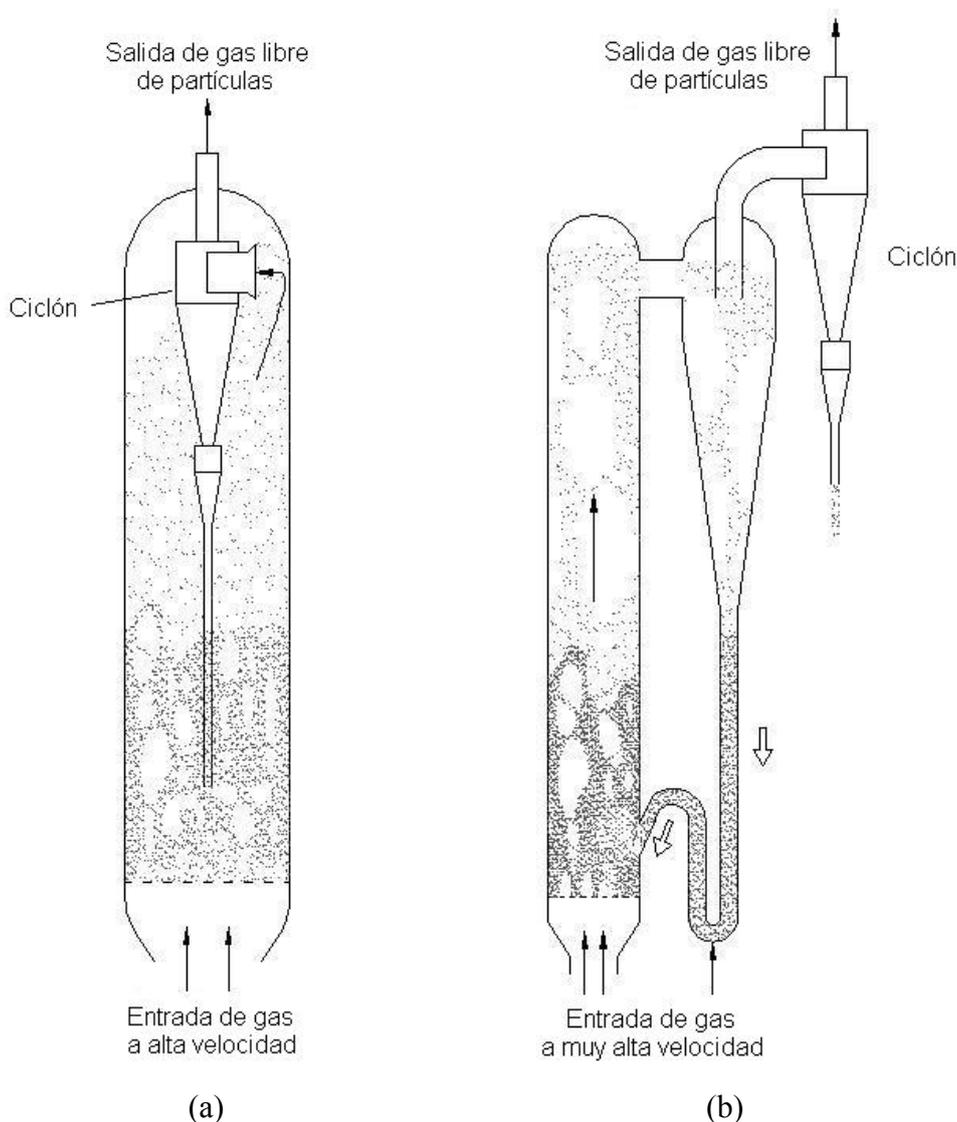


Figura 2.2. Ejemplos de lecho fluidizado circulante [1]: (a) Lecho fluidizado turbulento (con ciclón interno); (b) Lecho fluidizado de fase dispersa (con ciclón externo).

Otro modo de contacto gas-sólido es el lecho de chorro (Figura 2.3). En su operación, un chorro de gas a alta velocidad penetra a través de un lecho de partículas, transportando así algunas de ellas hasta la parte alta del lecho. El resto de partículas caen lentamente alrededor del chorro y entre el gas que se filtra con suavidad hacia arriba. En ocasiones se observa un comportamiento entre burbujeante y de chorro, y al sistema se le suele denominar lecho fluidizado de chorro.

Comparados con otros métodos de contacto gas-sólido, los lechos fluidizados tienen algunas propiedades características y de gran utilidad. En el caso de lechos fluidizados de líquido-sólido la utilidad es menor por razones asociadas a su comportamiento, de modo que hasta ahora las aplicaciones industriales de fluidización más importantes son con sistemas de gas-sólido.

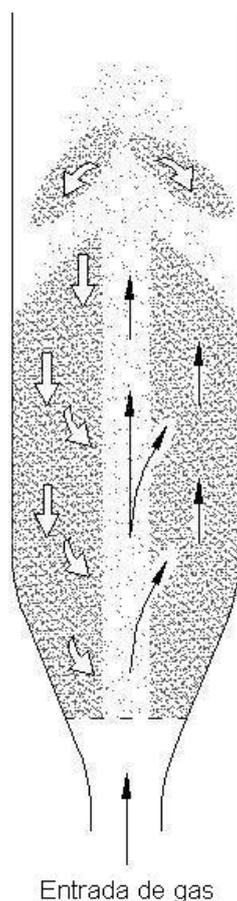


Figura 2.3. Lecho de chorro [1].

2.2. Comportamiento fluido de un lecho fluidizado

Un lecho de partículas de fase densa fluidizado con gas se asemeja mucho a un líquido en ebullición y, en muchos aspectos, muestra un comportamiento similar al de un fluido. De esta manera, un objeto de tamaño grande y poca densidad que se sumerge en el lecho fluidizado aparece inmediatamente en la superficie al dejarlo libre y flota. Por otra parte, si se inclina el depósito la superficie superior del lecho permanece horizontal y al conectar dos lechos fluidizados independientes sus niveles se igualan. Además, la diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia de altura entre ellos. El lecho también tiene propiedades semejantes a las del flujo de líquidos; así, las partículas se desplazan formando un chorro a través de un orificio en la pared del depósito y pueden formar un flujo desde un depósito a otro, como si de un líquido se tratara. En la Figura 2.4 se muestran algunos ejemplos de las propiedades mencionadas.

El comportamiento fluido que presentan los lechos fluidizados permite idear diferentes diseños de contacto entre las partículas del lecho y el gas o el líquido, para su aplicación en diversos procesos industriales.

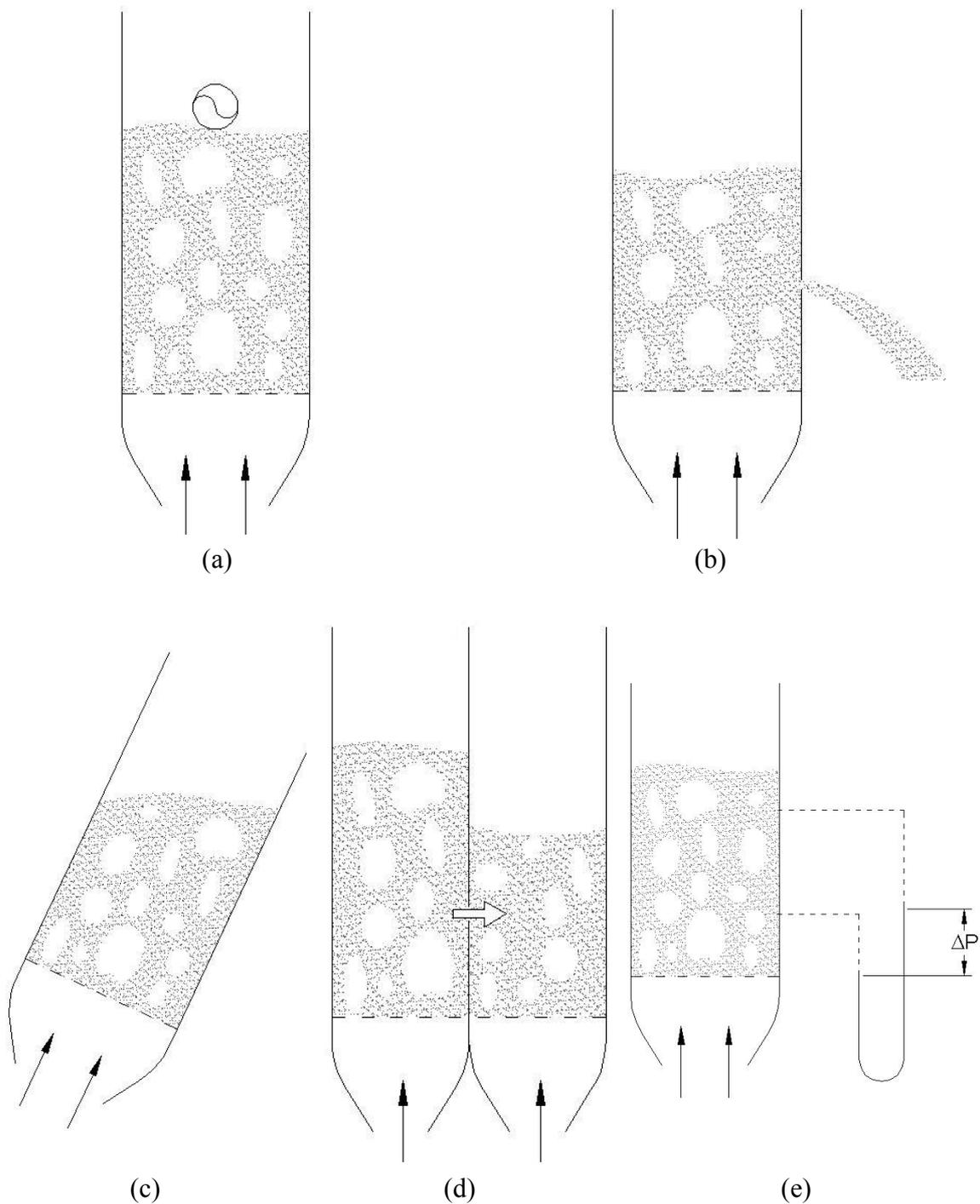


Figura 2.4. Comportamiento fluido de un lecho de partículas fluidizado [1]:

(a) Los objetos ligeros flotan sobre la superficie del lecho; (b) Las partículas abandonan el lecho describiendo un chorro a través de un agujero practicado en la pared; (c) La superficie se mantiene horizontal al inclinar el lecho; (d) Al poner en contacto dos lechos sus niveles se igualan; (e) La diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia entre sus alturas.

2.3. Calidad de fluidización

El término fluidización hace referencia tanto a sistemas de fase densa como a sistemas de fase dispersa, pero es en los primeros donde se concentran en mayor medida las tareas de investigación.

La capacidad para fluidizar de las partículas, y las condiciones de operación que lo permiten, varían mucho de unos sistemas a otros y están influidas por múltiples factores. El primero es el tamaño de los sólidos y su distribución. En general, las partículas pequeñas tienden a aglomerarse si están húmedas, con lo que el lecho se debe agitar para mantener las condiciones de fluidización. Esto se puede llevar a cabo con agitadores mecánicos o mediante la operación a velocidades del gas relativamente altas, utilizando la energía cinética del chorro de gas entrante para agitar los sólidos. Las partículas finas con una gran distribución de tamaños se pueden fluidizar en un amplio rango de velocidades de gas, permitiendo operaciones flexibles con lechos profundos y grandes.

Por el contrario, los lechos de partículas grandes con distribución de tamaños uniforme suelen fluidizar peor con aparición de sacudidas, chorros y fenómeno de slugging, lo que puede causar daños estructurales de importancia en lechos de gran tamaño. La calidad de fluidización de estos lechos se puede mejorar añadiendo pequeñas cantidades de finas partículas que harían de lubricantes. Además, las partículas grandes fluidizan en un rango de velocidades de gas mucho más estrecho. Por todo ello, se deben utilizar lechos poco profundos para fluidizar partículas de tamaños grandes.

Un segundo factor, de importancia en la calidad de fluidización, es la relación de densidades entre el fluido y las partículas. Normalmente, los sistemas de líquido-sólido fluidizan de manera homogénea, mientras que los sistemas de gas-sólido suelen mostrar heterogeneidades. A pesar de ello, es posible observar comportamientos atípicos con partículas de baja densidad en gases de densidad elevada, o partículas de alta densidad en líquidos poco densos.

Existen otros factores que pueden afectar a la calidad de fluidización, como son la geometría del lecho, los dispositivos de alimentación de gas, el tipo de partícula utilizada, o el hecho de que los sólidos puedan fluir libremente o tiendan a aglomerarse.

2.4. Propiedades de las partículas de fluidización

El término con el que se determina la masa de las partículas es la densidad de partícula, ρ_p , definida como la relación entre la masa de una partícula, m_p , y su volumen hidrodinámico, V_h (Ecuación (2.1)). Se entiende por volumen hidrodinámico el volumen visto por el fluido en su interacción con la partícula e incluye el volumen de todos los poros que ésta pueda tener.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_h} \quad (2.1)$$

En partículas no porosas, se puede medir la densidad de partícula fácilmente con la ayuda de aparatos como el picnómetro, pero éstos no se pueden utilizar con partículas porosas porque dan el valor de la densidad absoluta, ρ_{abs} (masa de partícula entre volumen de material sólido que compone la partícula) y ésta no es apropiada cuando se estudia la interacción con un fluido. En partículas porosas, la densidad de partícula no es fácil de medir directamente aunque se han propuesto diversos métodos para hacerlo.

Existe otro término que permite caracterizar el lecho de partículas. Éste es la densidad aparente del lecho, ρ_b , que define el cociente entre la masa de todas las partículas que forman el lecho, m_b , y el volumen que ocupan incluyendo los espacios vacíos entre ellas, denominado volumen aparente, V_{ap} .

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \quad (2.2)$$

A partir de la fracción de vacío del lecho fijo, ε , que representa la relación entre el volumen de espacios que separan las partículas del lecho y el volumen aparente de éste (Ecuación (2.3)), se puede establecer la dependencia entre las densidades de lecho y partícula (Ecuación (2.4)).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum V_h}{V_{ap}} \quad (2.3)$$

$$\rho_b = (1 - \varepsilon)\rho_p \quad (2.4)$$

Generalmente, el término empleado para definir el tamaño de las partículas es el diámetro de partícula, d_p . En caso de no ser éstas esféricas representa el diámetro de una esfera con la misma relación superficie a volumen que la partícula no esférica en cuestión.

2.5. Clasificación de las partículas de fluidización

La capacidad y el modo en que las diferentes partículas fluidizan varía según su naturaleza. Geldart [9] clasifica las partículas en cuatro grupos distintos, atendiendo a sus propiedades de fluidización en condiciones ambiente. La clasificación de Geldart es la referencia que actualmente más se utiliza en todos los campos de la tecnología de partículas.

Las partículas que al ser fluidizadas por aire en condiciones ambiente muestran un estado de fluidización no burbujeante, a la velocidad de mínima fluidización, seguido de un estado burbujeante a medida que la velocidad de fluidización aumenta, se clasifican dentro del Grupo A. Las partículas que bajo estas condiciones muestran únicamente fluidización burbujeante forman el Grupo B. El Grupo C lo constituyen partículas muy finas y cohesivas, que son incapaces de fluidizar en sentido estricto. Finalmente, en el Grupo D se incluyen aquellas partículas de gran tamaño que se caracterizan por formar lechos de chorro.

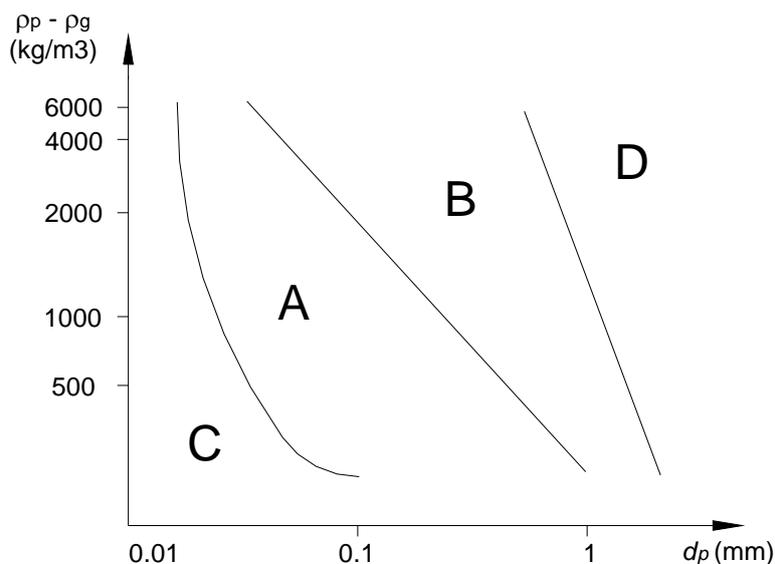


Figura 2.5. Clasificación de las partículas según Geldart por peso y tamaño [2].

Las propiedades de fluidización de una partícula en aire se pueden predecir si se clasifica en uno de los cuatro grupos. No obstante, se debe tener en cuenta que la operación a temperaturas y presiones por encima de la ambiente puede suponer que una partícula, en concreto, muestre un comportamiento típico de un grupo diferente al que realmente pertenece.

El estado de fluidización burbujeante es el que más comúnmente se encuentra en los sistemas de uso comercial, puesto que el rango de velocidades del gas de fluidización en el que tiene lugar el estado no burbujeante con partículas del Grupo A es pequeño. La velocidad superficial del gas a la que aparecen las primeras burbujas se conoce como velocidad de mínimo burbujeo, U_{mb} .

En las partículas del Grupo A, donde $U_{mb} > U_{mf}$, las burbujas se dividen y coalescen continuamente existiendo un máximo tamaño de burbuja alcanzado. De ahí que la fluidización sea suave y de buena calidad.

En las partículas de los Grupos B y D, con $U_{mb} = U_{mf}$, las burbujas crecen de manera continua sin existir un límite en cuanto al tamaño máximo alcanzado (sólo el definido por el diámetro del lecho). Por ello la fluidización es de peor calidad y lleva asociada grandes fluctuaciones de presión.

En el Grupo C, las fuerzas entre partículas son grandes comparadas con las fuerzas de inercia debidas al gas de fluidización. Así, las partículas no son capaces de alcanzar la separación necesaria y la fluidización como tal no se produce. No aparecen burbujas sino que se forman canales de gas a través del lecho de partículas. Sin embargo, la fluidización se puede conseguir con la ayuda de agitadores mecánicos o mediante vibración.

En la Tabla 2.1 se resume la clasificación de Geldart, de acuerdo con diversas características de las partículas y otros aspectos relativos a su fluidización.

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características principales	Ideales para fluidización Muestran un rango de no burbujeo	Comienzo del burbujeo a U_{mf}	Cohesivas, dificultad para fluidizar	Tamaño elevado
Partículas típicas	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina Cemento	Grava Granos de café
Expansión del lecho	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
Velocidad de desaireación	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida, luego exponencial	Rápida
Propiedades de burbujas	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite	No hay burbujas, sólo canales	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite
Mezcla de partículas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Mezcla de gas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Aparición de chorros	No	Sólo en lechos poco profundos	No	Sí, incluso en lechos profundos

Tabla 2.1. Clasificación de Geldart atendiendo al comportamiento de las partículas [2].

2.6. Formación de burbujas durante la fluidización

Se hace referencia en este apartado al fenómeno de burbujeo que tiene lugar en lechos fluidizados de fase densa con fluidización burbujeante (generalmente mediante gas). La experiencia ha demostrado que, en muchos aspectos, un lecho fluidizado burbujeante se comporta como un líquido burbujeante de baja viscosidad.

De este modo, la forma de las burbujas es parecida en ambos casos: casi esféricas las de pequeño tamaño, alargadas y deformadas cuando crecen, y esféricas con forma de tapón las de mayor tamaño. En los dos casos se observa el ascenso lento de las burbujas pequeñas, que pasa a ser más rápido en las grandes, pudiendo una serie de burbujas formar por coalescencia burbujas de mayor tamaño.

Además, se ha comprobado de forma experimental que la velocidad de ascenso de las burbujas depende de los mismos factores en ambos casos, pudiendo determinarse mediante expresiones similares. Existe una correlación empírica que define la velocidad de ascenso de una burbuja de tamaño grande y forma esférica en un líquido, que es aplicable a una burbuja en un lecho fluidizado. La expresión, desarrollada por Davies y Taylor [7], se enuncia del siguiente modo:

$$U_{br} = 0.711(gd_b)^{1/2} \quad (2.5)$$

donde d_b es el diámetro de una esfera de volumen igual al de la burbuja y g es la aceleración de la gravedad.

El caudal de gas introducido en el lecho para llevar a cabo la fluidización se divide en dos partes: una parte que atraviesa el lecho en forma de burbujas y otra que lo hace mediante la emulsión gas-sólido. En efecto, una cantidad de gas superior a la necesaria para fluidizar el lecho pasa a través de éste en forma de burbujas, manteniéndose la fase de emulsión en estado de mínima fluidización.

Se ha observado experimentalmente que existe una región alrededor de la burbuja con características fluidodinámicas diferentes al resto de la emulsión; esta región se denomina nube y asciende solidaria a la burbuja. En el interior de la burbuja el gas está en movimiento, generándose una recirculación que atraviesa la frontera de ésta y se introduce en la nube, la cual establece el límite físico para el gas que se encuentra recirculando.

Son varios los modelos que se han desarrollado para explicar el movimiento de gas y sólidos asociado al ascenso de burbujas en los lechos fluidizados. Así, se han planteado modelos de dos fases (burbuja más emulsión) [3, 8] y modelos de tres fases (burbuja más nube más emulsión) [1]. De forma general, los de dos fases consideran que la nube se integra en la emulsión y los de tres fases consideran burbuja, nube y emulsión como entidades independientes, que intercambian calor y masa entre sí por medio de las interfases que las separan.

2.7. Ventajas y desventajas de aplicación de los lechos fluidizados

Los lechos fluidizados muestran ciertas características deseables e indeseables durante su operación. Entre los aspectos ventajosos de estos sistemas se destacan los siguientes:

- El comportamiento fluido que presentan las partículas en estado de fluidización permite desarrollar las operaciones con facilidad.
- La rapidez con que se mezclan las partículas facilita la consecución de valores de temperatura constantes en todo el lecho, lo que confiere sencillez y seguridad al control de la operación.
- Un lecho con partículas bien mezcladas resiste con eficacia las rápidas variaciones de temperatura, responde lentamente a los cambios bruscos en las condiciones de operación y ofrece un gran margen de seguridad, evitando pérdidas de temperatura en reacciones altamente exotérmicas.
- La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible conservar (o suministrar) grandes cantidades de calor que se puedan producir (o necesitar) en reactores de gran tamaño.
- Las velocidades de transferencia de calor y masa entre el gas y las partículas son mayores que en otros sistemas de mezclado.
- La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en él es alta, por lo que los intercambiadores de calor dentro de los lechos fluidizados requieren una superficie de transferencia relativamente baja.

Por todas las razones mencionadas anteriormente, los lechos fluidizados son ideales para ciertas operaciones industriales. No obstante presentan una serie de desventajas que impiden su desarrollo en algunas aplicaciones. Las principales desventajas de los lechos fluidizados son:

- En lechos con fluidización burbujeante de partículas finas, la dificultad para definir el flujo de gas supone un mezclado ineficiente. Esto puede ser de especial importancia cuando se requiere una conversión elevada de reactantes gaseosos o una alta selectividad para una reacción intermedia.
- La rápida mezcla de partículas en el lecho provoca tiempos de residencia variables. En el tratamiento continuo de sólidos, se tiene un producto no uniforme y un rendimiento bajo, especialmente a altos niveles de conversión. Para reacciones catalíticas el movimiento de partículas catalizadoras porosas, que continuamente capturan y liberan moléculas de gas reactante, contribuye al mezclado posterior de reactantes gaseosos disminuyéndose así el rendimiento del sistema.
- La erosión en depósitos y tuberías debida a la abrasión por las partículas puede ser pronunciada. Por otra parte, las partículas finas en ocasiones son arrastradas por el gas y deben ser reemplazadas.
- En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de las partículas finas puede requerir un descenso en la temperatura de trabajo, reduciéndose así la velocidad de la reacción de forma considerable.

La convincente ventaja relativa a la economía de utilización de los lechos fluidizados es la principal responsable de su desarrollo con éxito en operaciones industriales. Aún así, ese éxito pasa por entender y superar sus desventajas.

2.8. Aplicaciones industriales de la fluidización

La fluidización es un fenómeno conocido desde hace tiempo que, debido a sus varias particularidades, ha encontrado aplicación en diferentes sectores de la industria. Así, se emplean lechos fluidizados en diversos procesos físicos como intercambiadores de calor, recubrimientos de objetos metálicos, adsorción de componentes u operaciones de secado. Además, se usan en procesos químicos de distinta naturaleza como reacciones de síntesis, craqueo de hidrocarburos, combustión e incineración, gasificación, calcinación o tratamiento de minerales. Una aplicación particular de los lechos fluidizados, en el campo de la biología, es el cultivo de microorganismos.

2.8.1. Operaciones físicas

2.8.1.1. Intercambio de calor

Los lechos fluidizados se utilizan desde hace tiempo como intercambiadores de calor, debido a su gran capacidad para transferir el calor y mantener uniforme la temperatura de operación. Son adecuados para aplicaciones en las que se necesita enfriar metales o aleaciones rápidamente, de cara a obtener en ellos ciertas propiedades deseadas. En

algunas aplicaciones el intercambio de calor se produce sin contacto entre las partículas y el gas de refrigeración, que circula por tubos en el interior del lecho fluidizado. Una aplicación común, basada en esta idea, consiste en hacer circular agua a través de tubos sumergidos en un lecho fluidizado de partículas a alta temperatura, recuperando el calor contenido en éstas para producir vapor.

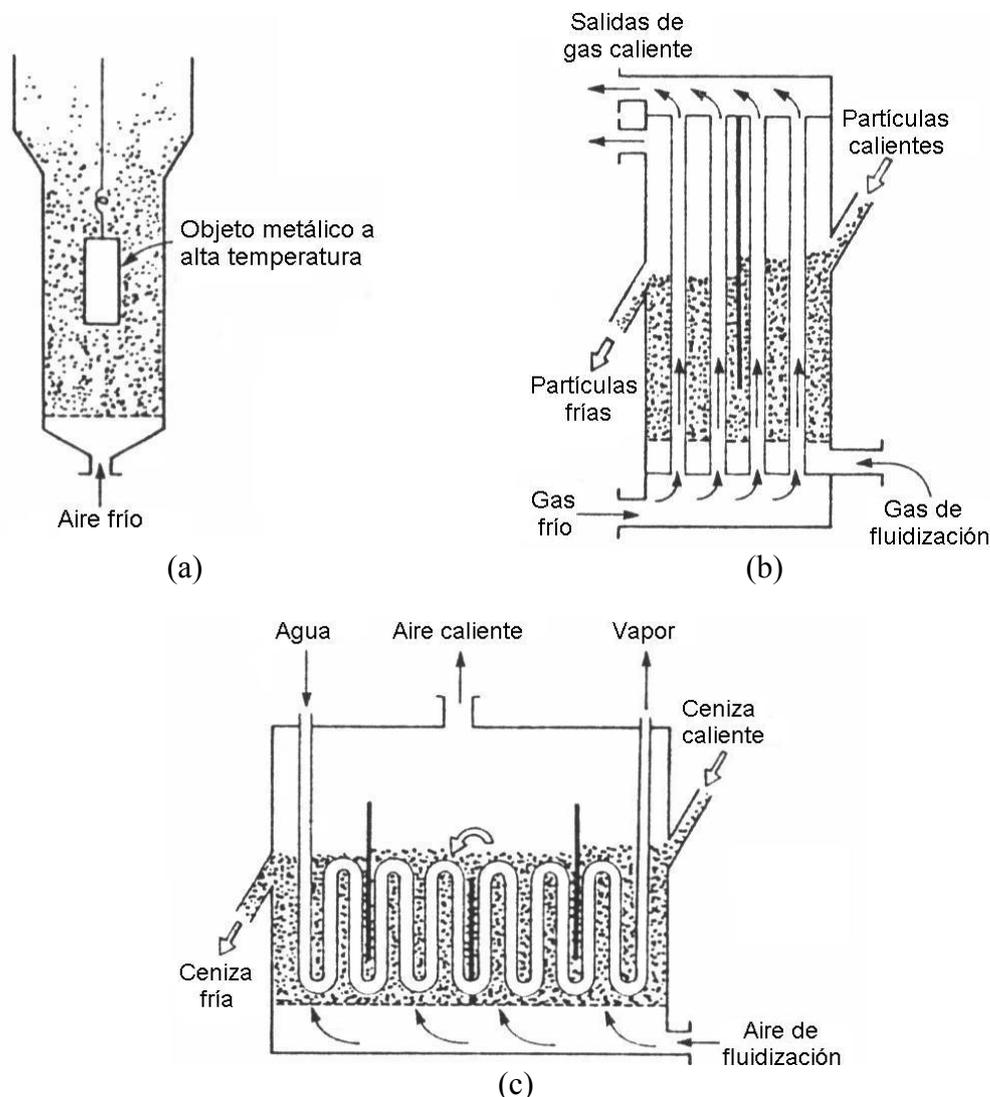


Figura 2.6. Ejemplos de intercambiadores de calor en lecho fluidizado [1]: (a) para enfriamiento rápido de metales; (b) para intercambio de calor indirecto entre gas y partículas; (c) para generación de vapor a partir de ceniza caliente.

2.8.1.2. Recubrimiento de objetos metálicos

Los lechos fluidizados permiten hacer de manera sencilla recubrimientos plásticos en objetos metálicos. El procedimiento consiste en fluidizar mediante aire partículas finas del material plástico deseado. El objeto a recubrir se sumerge en el lecho, durante un tiempo corto, a una temperatura superior al punto de fusión del plástico. Las partículas se funden adhiriéndose a la superficie del metal, formando una fina capa sobre ella.

2.8.1.3. Adsorción

En ocasiones, es necesario eliminar componentes muy diluidos en grandes flujos de gas. En estos casos, los procesos continuos de adsorción mediante fluidización a través de múltiples etapas llegan a ser de gran efectividad. En la adsorción por lecho fluidizado los componentes se adsorben de forma periódica con partículas de carbón activo y se eliminan posteriormente con vapor. Los ciclos de adsorción y desorción (regeneración del carbón activo) se llevan a cabo en el mismo lecho. Ejemplos de aplicación son la retirada y concentración de solventes como disulfuro de carbono, acetona, etanol y acetato de etilo, o la eliminación de trazas contaminantes en gases residuales.

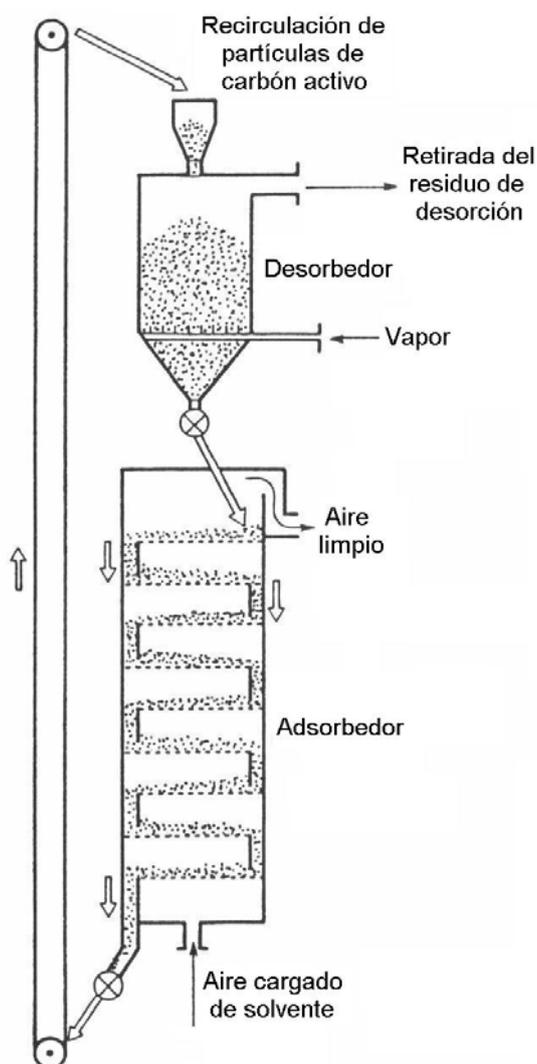


Figura 2.7. Adsorción en lecho fluidizado (desarrollado por Courtaulds Ltd.) [1].

2.8.1.4. Secado de sólidos

Los secadores de lecho fluidizado se han empleado en gran número de aplicaciones industriales debido a su gran capacidad, su bajo coste de construcción, su sencillez de operación y su alta eficiencia térmica. Son apropiados para cualquier tipo de sólido húmedo, siempre que éste pueda ser fluidizado por gas caliente. Comercialmente se

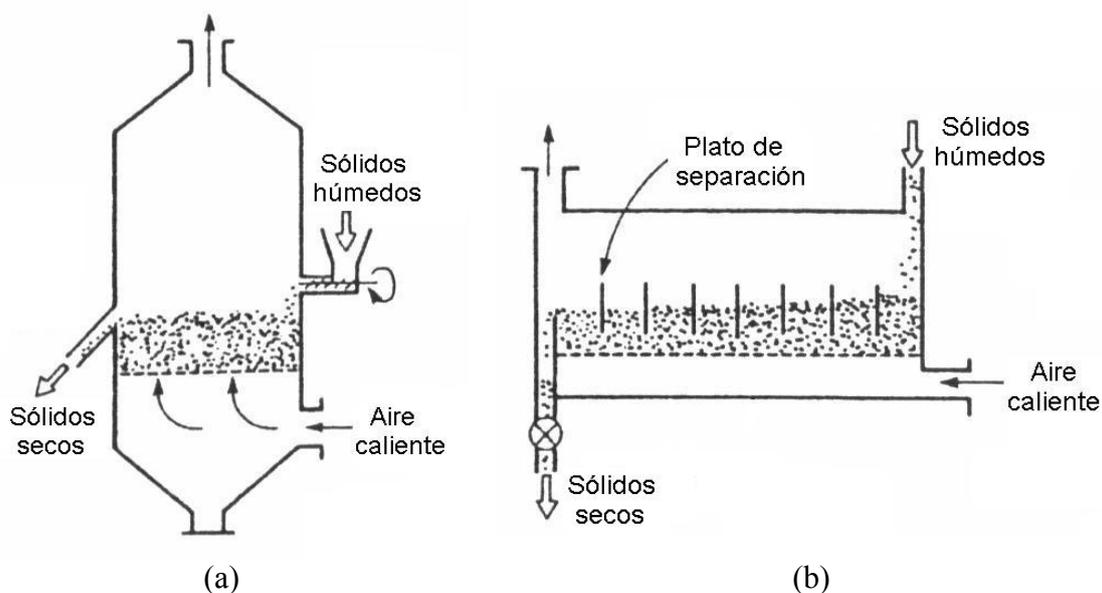
emplean para el secado de minerales, arena, polímeros, productos farmacéuticos o fertilizantes, siendo múltiples los diseños que se han desarrollado. Las acerías utilizan grandes lechos para secar el carbón antes de introducirlo en los hornos, mientras que las industrias farmacéutica y química emplean en sus procesos lechos de pequeño tamaño aunque muy eficientes.

La principal consideración a tener en cuenta a la hora de secar los sólidos se basa en el tiempo que éstos deben permanecer en el lecho, de manera que en algunos casos se necesitan tiempos de secado iguales en todas las partículas. Por ello se han planteado diferentes diseños, desde lechos simples para partículas menos delicadas hasta lechos multietapa o con distribuidores rotatorios, para sólidos que necesitan un mayor control del tiempo de secado. En materiales que requieren tiempos de residencia muy pequeños, se emplean lechos fluidizados en fase dispersa o líneas de transporte neumático.

Generalmente el secado se lleva a cabo mediante fluidización con aire caliente. Sin embargo existen diseños en los que el calor necesario para el secado se aporta mediante tubos de intercambio sumergidos en el lecho, reduciéndose así el volumen de gas necesario para la fluidización. En otros casos, en que los sólidos se encuentran muy húmedos, se pueden conseguir elevadas eficiencias térmicas si se opera a alta presión y se fluidiza con vapor sobrecalentado, debiendo ser el sistema cerrado en este caso.

Algunos sólidos pueden contener cantidades considerables de disolventes como metanol o tolueno, presentando cierto riesgo de explosión. En estos casos se fluidizan los sólidos con gas inerte, vapor de agua o el propio vapor del disolvente en concreto y se seca mediante un intercambiador de tubos, en un sistema cerrado.

Otros sólidos pueden ser pegajosos o con tendencia a apelmazarse, resultando por ello difíciles de secar en lechos fluidizados ordinarios. En estos casos se suelen utilizar lechos fluidizados vibratorios, donde el distribuidor de aire caliente vibra de modo que se consigue fluidizar las partículas sin que éstas se aglomeren, siendo generalmente de aplicación en lechos poco profundos.



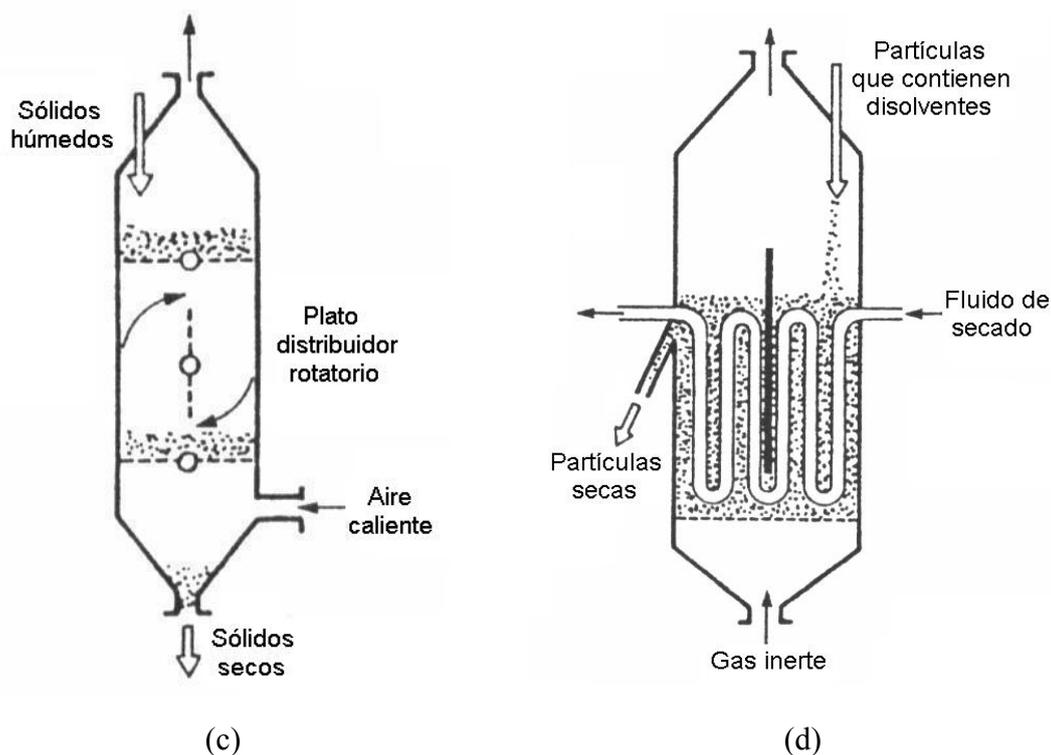


Figura 2.8. Ejemplos de fluidización en procesos de secado [1]: (a) diseño de una sola etapa; (b) diseño multietapa; (c) diseño con distribuidor rotatorio para asegurar tiempos de residencia uniformes; (d) diseño para partículas que contienen disolventes.

2.8.2. Reacciones de síntesis

Los lechos fluidizados presentan una característica por la que resultan más adecuados que los lechos fijos para el desarrollo de reacciones en fase gas con catalizadores sólidos; esa característica tiene que ver con la necesidad de mantener un estricto control de la temperatura en la zona donde se produce la reacción. Existen diversas razones que justifican esta necesidad: la reacción puede ser explosiva fuera de un estrecho rango de temperaturas, la obtención de los productos deseados es dependiente de la temperatura de operación, o la concentración de altas temperaturas en el catalizador puede conducir a su rápido deterioro. Y por otra parte estas reacciones son altamente exotérmicas, lo que hace más difícil el control de la temperatura.

Puesto que los gases presentan malos coeficientes de transferencia de calor y muy bajos valores de capacidad calorífica, comparados con sus calores de reacción, resulta difícil alcanzar el control de temperatura necesario mediante los lechos fijos. En estos sistemas son necesarias elevadas superficies de intercambio de calor y grandes diluciones de gases reactantes. El control es mucho más fácil de obtener en lechos fluidizados porque la rápida circulación de las partículas, con capacidad calorífica relativamente alta, distribuye el calor de forma eficiente y ayuda a eliminar las posibles zonas con altas concentraciones de calor.

Algunos ejemplos de productos o reacciones de síntesis llevados a cabo mediante procesos de fluidización son: en lecho fluidizado de partículas finas: anhídrido ftálico,

acetato de vinilo, acrilonitrilo, dicloruro de etileno, clorometano, anhídrido maleico, *o*-cresol y 2,6-xilenol; en lecho fluidizado rápido: síntesis de Fischer-Tropsch; en lecho fluidizado burbujeante de partículas gruesas: polietileno y polipropileno.

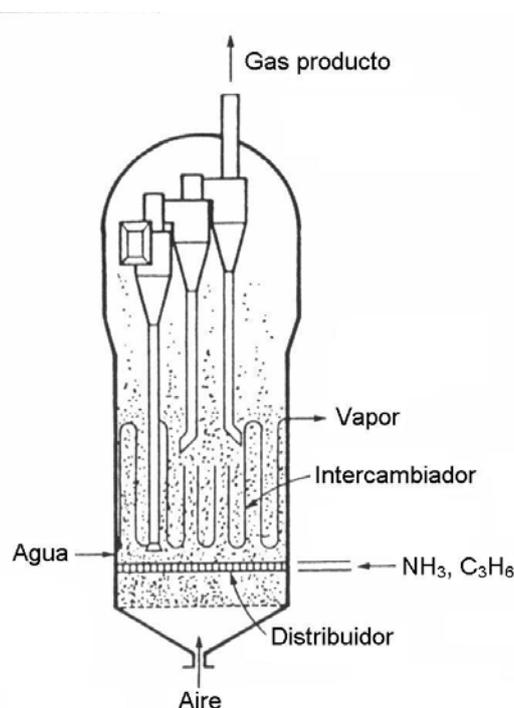


Figura 2.9. Reactor para producción de acrilonitrilo (proceso Sohio) [1].

2.8.3. Craqueo de hidrocarburos

La rotura catalítica de hidrocarburos en elementos de menor peso molecular, por medio de las denominadas reacciones de craqueo, presenta dos particularidades: las reacciones son endotérmicas y, además, se produce deposición de carbono en la superficie de los sólidos cercanos. Estas características, junto con las grandes cantidades de material a tratar, determinan el tipo de proceso utilizado industrialmente para estas reacciones. Básicamente, estos procesos se dividen en dos módulos: un primer módulo para la absorción de calor, la reacción y la deposición de carbono, y un segundo donde el carbono depositado se quema y se recupera el calor. Este calor se devuelve al primer módulo, mediante las propias partículas en recirculación, y se emplea para llevar a cabo la reacción. La única forma en que esto se puede desarrollar de manera eficiente es con un sistema de circulación de partículas mediante uno o más lechos fluidizados. Prácticamente todos los procesos en la actualidad se basan en este principio de operación.

2.8.3.1. Craqueo catalítico fluido

En contacto con el catalizador adecuado, los hidrocarburos pesados en fase vapor se dividen en elementos de menor peso molecular. Son muchos los factores involucrados siendo clave, para desarrollar el proceso de craqueo con éxito, el modo en que se suministra la gran cantidad de calor necesaria para la reacción endotérmica y la manera

de regenerar las partículas catalizadoras con rapidez y efectividad. El método de craqueo catalítico fluido (FCC, del inglés fluid catalytic cracking) lleva a cabo los puntos anteriores con sencillez, de modo que realiza simultáneamente la regeneración de las partículas catalizadoras y del calor de reacción. Por ello, el proceso FCC es el de aplicación más extensa en el craqueo de hidrocarburos.

La característica fundamental del proceso FCC es la unión de las dos unidades: en primer lugar, existe un reactor a una temperatura de en torno a 500 °C, donde el petróleo suministrado en fase vapor se fragmenta en contacto con las partículas catalizadoras a alta temperatura. Tras un determinado tiempo de residencia, se envían estas partículas al regenerador, que se encuentra a 580 °C aproximadamente, donde los depósitos de carbono se queman y se reducen desde el 1 – 2 % hasta el 0.4 – 0.8 %. Pasados 5 – 10 minutos las partículas calientes se devuelven al reactor.

Existen diferentes diseños basados en el proceso FCC. La conjunción entre reactor y regenerador, el tipo y tamaño de catalizador y las líneas de transporte utilizadas varían de unos procesos a otros. Sin embargo los fundamentos son los mismos y en todos los casos implican el uso de lechos fluidizados.

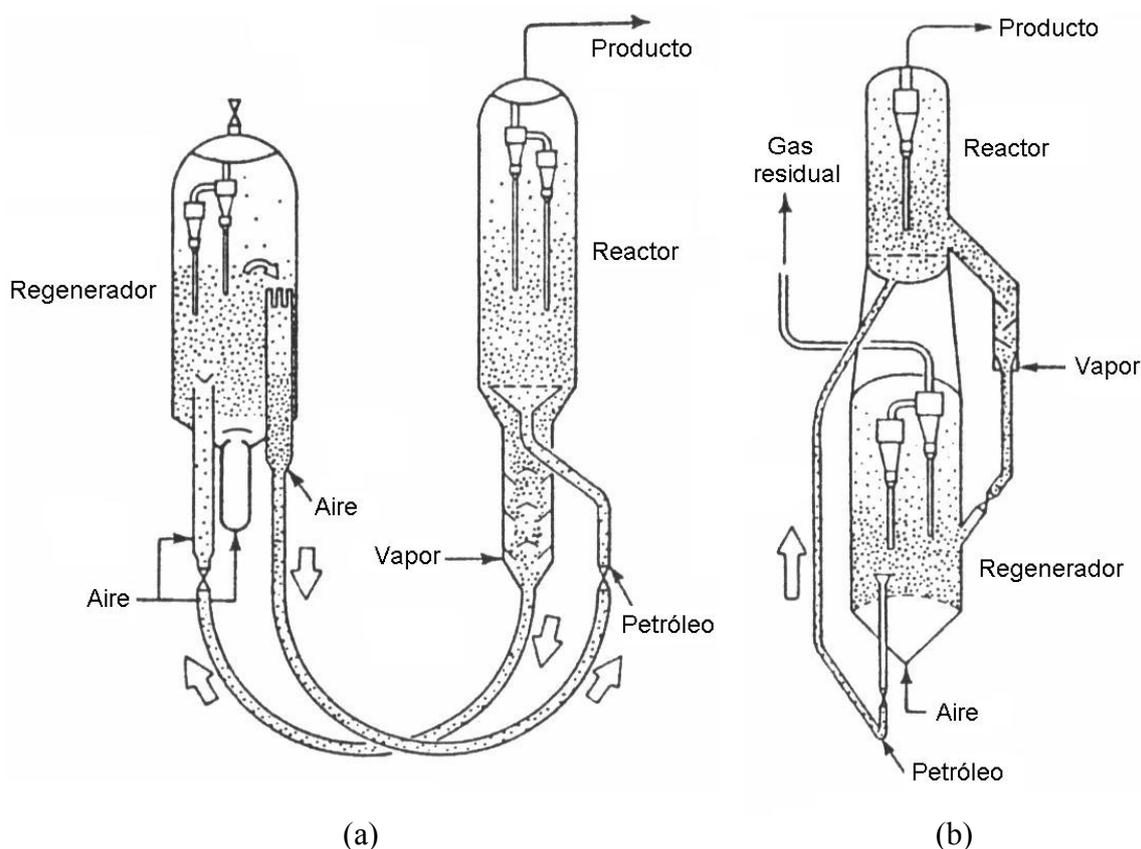


Figura 2.10. Unidades de craqueo catalítico fluido [1]: (a) modelo Exxon IV; (b) modelo diseñado por la Universal Oil Products Company.

2.8.3.2. Craqueo térmico

Los lechos fluidizados también se emplean para procesos de craqueo térmico, siendo su uso más típico el de producción de etileno y propileno a partir de la fragmentación de nafta procedente del petróleo, mediante reacciones altamente endotérmicas. Etileno y propileno sirven como elementos de partida en síntesis orgánicas y polimerizaciones.

A pesar de haberse desarrollado procesos con sistemas de un solo lecho fluidizado, son los sistemas de dos lechos con recirculación de partículas los que suponen una operación de mayor éxito. Un ejemplo es el proceso Kunii-Kunugi. En él se utilizan partículas de coque (600 – 1000 μm), que se hacen circular entre el reactor y el regenerador. Este proceso se basa en la fluidización en fase densa, incluso para el desplazamiento hacia arriba de las partículas, con el fin de prevenir el atasco de los conductos de transporte. La producción es de en torno al 25 % en peso de etileno y el 11 % en peso de propileno, a una temperatura de 750 °C aproximadamente.

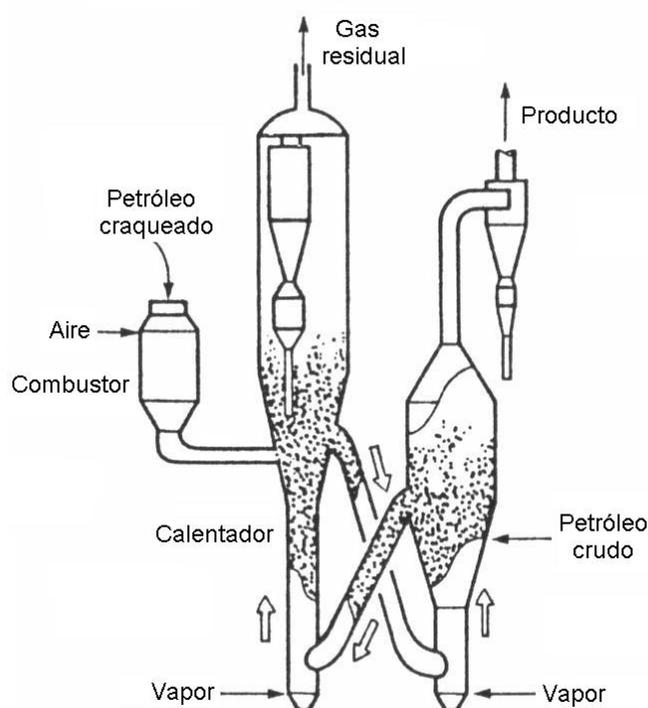


Figura 2.11. Ejemplo de fluidización en craqueo térmico (proceso Kunii-Kunugi) [1].

2.8.4. Combustión

2.8.4.1. Combustión de carbón

Con la esperanza de encontrar un sistema de combustión alternativo válido para carbón de baja calidad y, en general, de combustibles que no se pueden quemar en calderas convencionales de forma eficiente, comenzó a desarrollarse la combustión en lecho fluidizado (FBC, del inglés fluidized bed combustion) que acaparó el esfuerzo de varias potencias tecnológicas con la crisis del petróleo, a comienzos de los años 1970s.

Un diseño típico es el basado en un lecho fluidizado burbujeante a presión atmosférica. En éste, se fluidiza en primer lugar un lecho de partículas de caliza o dolomita mediante aire y, posteriormente, se inyectan partículas pequeñas de carbón (3 – 6 mm). Debido a las elevadas velocidades del gas con que operan estas unidades, se produce una pérdida considerable de partículas. Estas partículas, que suelen contener carbono sin quemar, bien se atrapan y queman en celdas diseñadas para ello o se devuelven al lecho fluidizado con la ayuda de ciclones.

Debido a que las partículas de caliza y dolomita capturan mejor los componentes de azufre si el lecho se mantiene a 850 °C aproximadamente, los intercambiadores de calor suelen ir en el propio lecho. Además existen intercambiadores en las paredes del mismo y en la sección de salida de gases, para lograr un mejor rendimiento del proceso.

En combustión de carbón mediante lechos fluidizados existen numerosos diseños diferentes al mencionado que se han desarrollado comercialmente, en unidades de pequeña y gran escala, y operando a presión atmosférica o a alta presión.

Los lechos fluidizados presentan la ventaja de reducir las emisiones de NO_x y SO_x con respecto a otras tecnologías de combustión de carbón pulverizado, debido a que trabajan a menor temperatura.

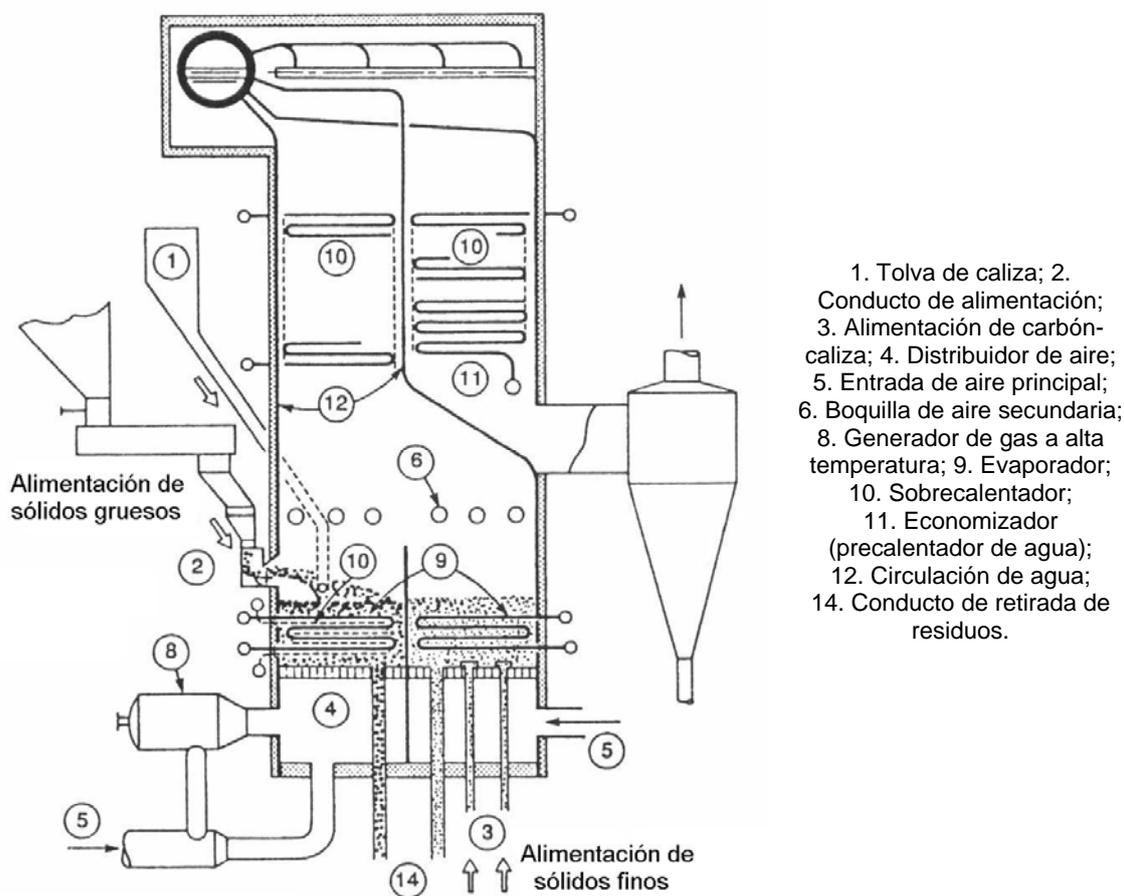


Figura 2.12. Ejemplo de combustión de carbón en lecho fluidizado [1].

2.8.4.2. Incineración de residuos sólidos

La incineración de residuos sólidos urbanos es algo inevitable en áreas pobladas, utilizándose normalmente quemadores de parrilla. Estos sistemas, aunque eficientes térmicamente, en ocasiones son problemáticos debido a la emisión de fuertes olores. Estos problemas asociados se pueden evitar con incineradores de lecho fluidizado, que permiten quemar de forma eficiente combustibles de bajo poder calorífico y alto contenido en cenizas, como es el caso de los residuos sólidos.

En el proceso los residuos se trituran, retirándose previamente los elementos metálicos, y se fluidiza el resultado en el incinerador. La temperatura de operación del lecho es de 800 – 900 °C, con lo que los elementos orgánicos se descomponen y queman. El calor sobrante se evacua del lecho mediante circulación de agua, siendo aprovechable esa energía excedente. Los sólidos se queman por completo y la ceniza se elimina por la parte inferior del lecho.

Para mejorar la eficiencia de estos sistemas hay que tratar convenientemente los residuos, con el fin de eliminar los materiales inorgánicos. Además, como en todas las unidades, es necesario garantizar la calidad de las emisiones mediante el uso de filtros y analizadores adecuados.

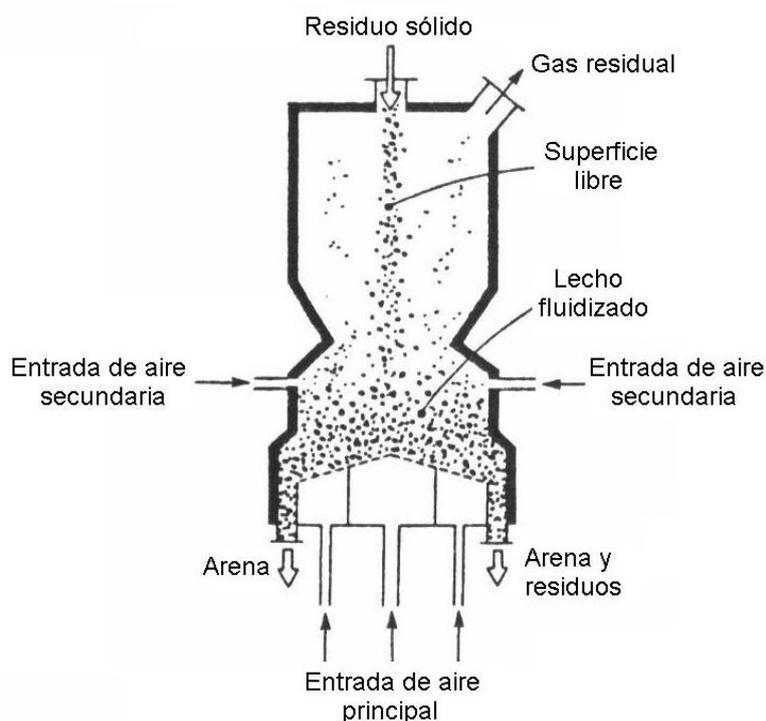


Figura 2.13. Ejemplo de incinerador en lecho fluidizado (modelo Ebara) [1].

2.8.5. Gasificación

2.8.5.1. Gasificación de carbón

La gasificación de carbón fue de las primeras aplicaciones con importancia de los lechos fluidizados en el ámbito comercial. Este proceso ha sido muy utilizado para la obtención de gas combustible aunque, en ocasiones, se ha visto desplazado por la efectividad de otros combustibles como el petróleo o el gas natural.

La gasificación es un proceso en el que se quema la materia sólida, carbón en este caso, con aporte mínimo de oxígeno. El objetivo es eliminar partículas y otras impurezas del combustible sólido convirtiéndolo en gas, para poder utilizarlo en sistemas de combustión exigentes en lo que a la calidad del combustible se refiere. El producto sólido obtenido en la gasificación (en inglés char) está formado por cenizas y residuos carbonosos. La gasificación se puede llevar a cabo mediante diferentes agentes (aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno) y de ello dependerá el contenido energético del gas obtenido.

Son múltiples los diseños que se han llevado a cabo sobre gasificadores de carbón en lecho fluidizado, desde procesos con un solo lecho hasta procesos con múltiples lechos, con recirculación de partículas, operando a alta presión y fluidizados con diferentes agentes gasificantes.

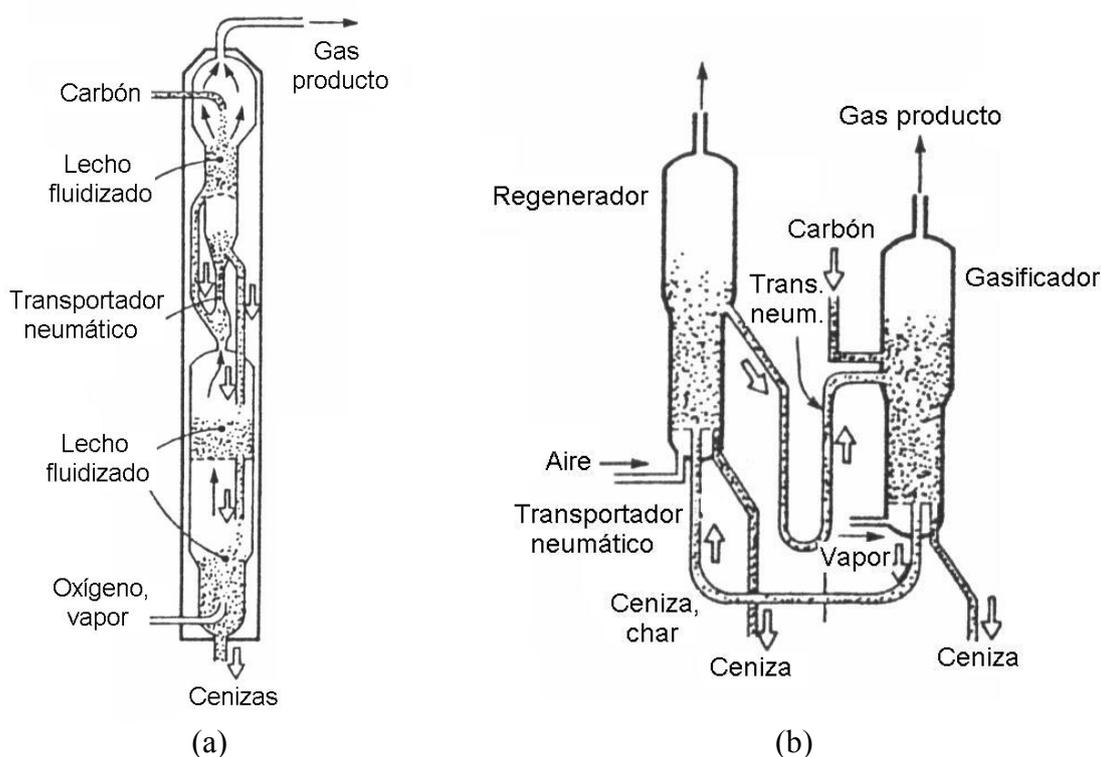


Figura 2.14. Ejemplos de gasificación de carbón en lecho fluidizado [1]:
 (a) proceso Hygas, desarrollado por el Institute of Gas Technology;
 (b) proceso desarrollado por Union Carbide.

2.8.5.2. Gasificación de residuos sólidos

Los residuos sólidos urbanos en ocasiones contienen materiales tóxicos y peligrosos. Por ello, en las plantas de incineración ordinarias es necesario implantar equipos para la limpieza de los gases de escape, de acuerdo con las exigencias medioambientales vigentes. Sin embargo, la limpieza asociada a los gases de combustión en plantas de gasificación resulta más simple y barata porque el volumen de gas producido es menor que en las incineradoras, resultando ventajosas en el tratamiento de residuos sólidos.

Un ejemplo de gasificador en lecho fluidizado es el empleado en el proceso Pyrox (Figura 2.15). El proceso se compone de dos lechos fluidizados conectados por dos conductos en pendiente descendente, utilizando arena para recircular el calor. Los residuos triturados se introducen de forma continua en el gasificador, junto con vapor, para producir gas combustible enriquecido. La materia sólida sobrante se envía al regenerador, junto con la arena del lecho, y allí se produce su combustión. Los gases residuales se expulsan y la arena caliente se devuelve al gasificador proporcionando energía para la posterior gasificación.

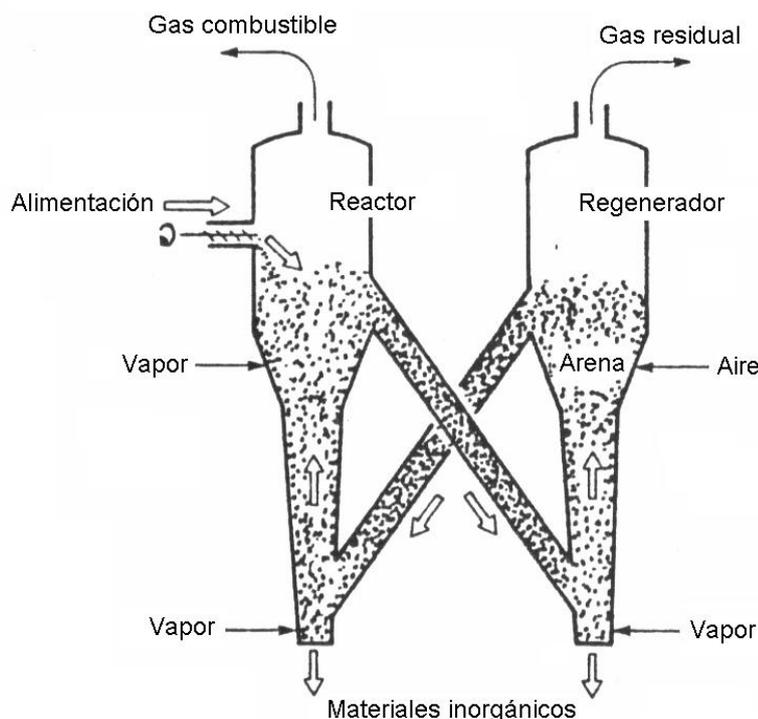


Figura 2.15. Gasificación de residuos sólidos en lecho fluidizado (proceso Pyrox, desarrollado por Tsukishima Co.) [1].

2.8.6. Activación de carbón

El carbón activado se utiliza para la adsorción de contaminantes en corrientes gaseosas y líquidas, para la separación de sustancias orgánicas, en la recuperación de solventes y como catalizador. En la activación del carbón mediante lecho fluidizado se emplea como materia prima carbón, madera u otros residuos vegetales (cáscara de coco o cacahuete). La activación se divide en dos fases: la carbonización de los sólidos

precursores y la activación o gasificación del carbonizado, que tiene lugar a una temperatura de 800 – 1000 °C. En la carbonización se eliminan elementos como H_2 y O_2 de los precursores, para formar un esqueleto carbonoso. Durante la gasificación el carbonizado se fluidiza con un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor de agua o combinación de éstos) de manera que se eliminan los átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y la superficie específica.

Los lechos fluidizados suelen ser unidades multietapa, que proporcionan una distribución del tiempo de residencia más uniforme de los sólidos y ayudan a recuperar calor para la gasificación, mediante la combustión posterior de CO y H_2 procedente de la carbonización.

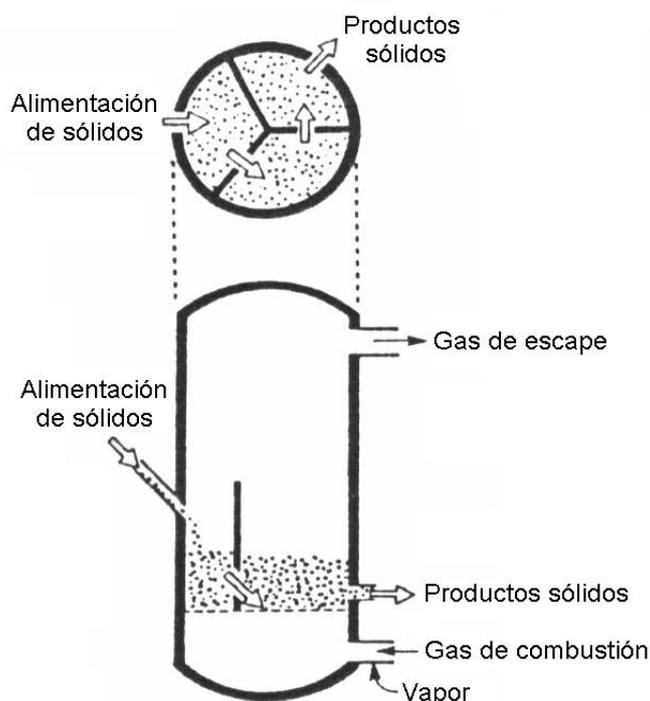


Figura 2.16. Ejemplo de activación de carbón en lecho fluidizado [1].

2.8.7. Calcinación

Las partículas de caliza y dolomita se pueden calcinar de forma sencilla en un lecho fluidizado quemando directamente combustible en el lecho. La reacción es altamente endotérmica por lo que supone un elevado derroche de combustible. Para recuperar gran parte del calor se suelen emplear sistemas multietapa, donde el material bruto se introduce por la etapa superior y va cayendo de etapa en etapa. En la etapa de calcinación, que es una de las inferiores, se inyecta combustible que se mezcla con el aire de fluidización quemando las partículas de material. El calor residual sirve para aumentar la temperatura de las partículas de las fases superiores y los restos calcinados abandonan el lecho por la parte inferior.

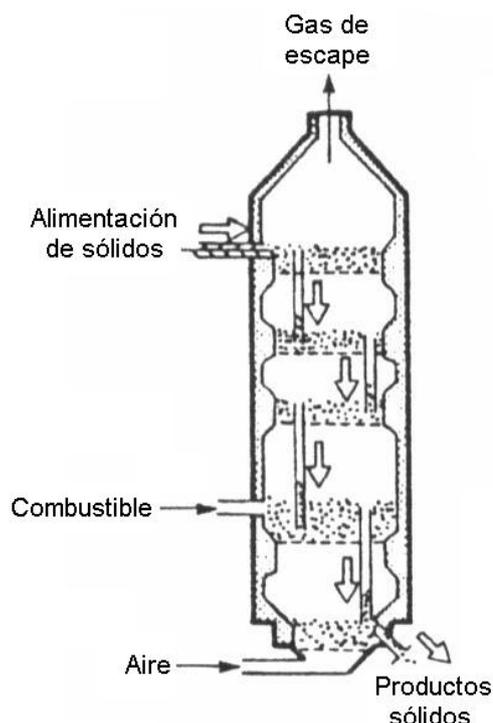


Figura 2.17. Ejemplo de calcinación de caliza en lecho fluidizado [1].

2.8.8. Reacciones con sólidos

Los lechos fluidizados se emplean también para llevar a cabo ciertas reacciones de cara a modificar las características de algunos minerales.

Una aplicación es la de tostación para obtener metales a partir de sulfuros de mineral. La reacción en este caso se caracteriza por ser una oxidación levemente exotérmica, con lo que se suelen emplear lechos fluidizados de una sola etapa sin evacuación de calor o, en su caso, con una ligera refrigeración. Estas unidades requieren generalmente menor exceso de aire con lo que se obtienen gases de escape con una concentración mayor de dióxido de azufre, que se debe tener en cuenta de cara a cumplir las pertinentes exigencias medioambientales.

También se emplean lechos fluidizados en la producción de silicio de elevada pureza para la fabricación de semiconductores y células solares. La obtención de silicio puro a partir de silicio de grado metalúrgico (tetracloruro de silicio) conlleva diversos pasos sobre los que se han desarrollado diferentes unidades de lecho fluidizado.

La cloración o fluorinación de óxidos de metal es otra de las aplicaciones de los lechos fluidizados para la obtención de metal puro. Así por ejemplo, en la producción de titanio o zirconio se plantean estrictos requerimientos, por la alta temperatura de la reacción y la estanqueidad necesaria debida al tratamiento con cloro, que se pueden lograr con el uso de lechos fluidizados.

Otro desarrollo de los lechos fluidizados es la reducción de óxidos de hierro, para producir hierro y acero a partir de partículas de mineral de alto grado. Son varios los procesos que se han desarrollado sobre esta aplicación de los lechos fluidizados, comenzando por unidades de varias etapas hasta unidades donde la reducción se lleva a cabo de forma directa y con más eficiencia. En la Figura 2.18 se muestra una unidad de reducción directa, donde las partículas de mineral de hierro se introducen a 700 °C en el reactor, que dispone de distribuidores rotatorios para evitar la aglomeración de sólidos. Se incluyen además partículas de coque que se recirculan entre reactor y calentador, donde el carbón se quema y gasifica con oxígeno. El gas de escape del calentador se puede tratar y usar para alimentar el reactor.

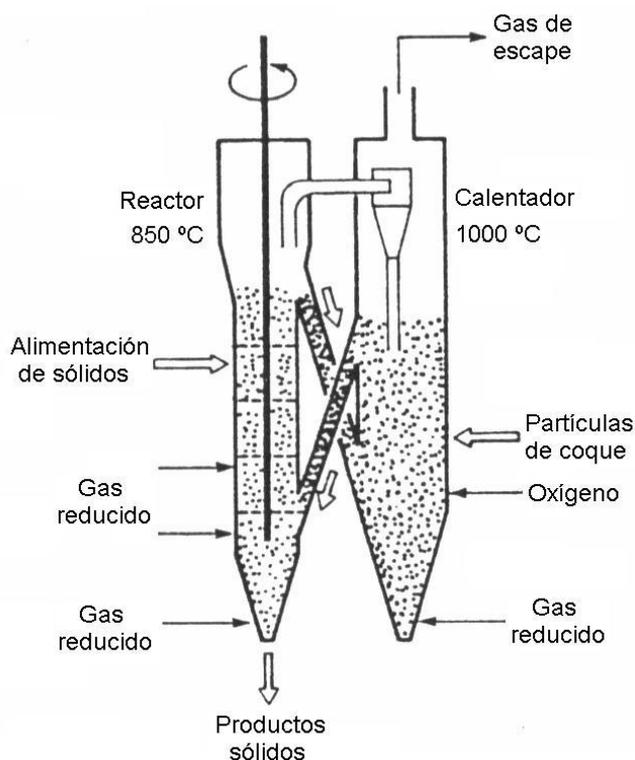


Figura 2.18. Ejemplo de lecho fluidizado en la reducción de óxidos de hierro (proceso desarrollado por Kawasaki Iron and Steel) [1].

2.8.9. Biofluidización

El cultivo de microorganismos resulta ser una de las aplicaciones más peculiares de la fluidización. En la Figura 2.19 se muestra un diseño desarrollado para cultivar el hongo *Aspergillus Sojae*, en la producción de salsa de soja. En primer lugar se trata el trigo y se pasteuriza con vapor sobrecalentado, fluidizándose más tarde con aire esterilizado. El lecho se rocía con agua para mantener la humedad al nivel deseado y se introducen las semillas de microorganismos mediante un eyector.

El cultivo de microorganismos en lechos fluidizados resulta más ventajoso que el cultivo convencional por diferentes motivos: mayor efectividad en el crecimiento de la superficie de los microorganismos, fácil transferencia de oxígeno lo que activa el metabolismo, eficiencia en la eliminación del calor y CO_2 generado por el metabolismo y facilidad para controlar temperatura, humedad y pH.

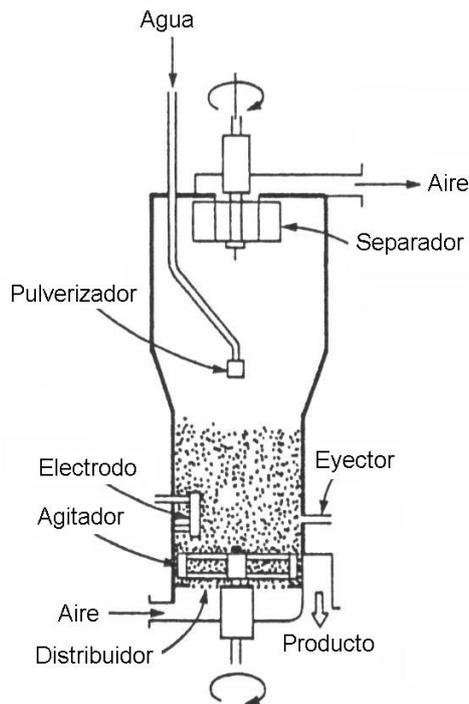


Figura 2.19. Ejemplo de lecho fluidizado en la producción de salsa de soja (modelo desarrollado por Kikkoman Co.) [1].

En este Apartado 2.8 se han descrito algunas de las más importantes aplicaciones de los lechos fluidizados, siendo muchas otras las utilidades que han encontrado en los diferentes sectores de la industria. En las referencias [20 – 22] se encuentra la dirección web de algunos fabricantes de lechos fluidizados.

Referencias bibliográficas Capítulo 2

- [1] Apartados 2.1, 2.2, 2.3, 2.6, 2.7, 2.8
- [2] Apartados 2.4, 2.5
- [3] [7] [8] Apartado 2.6
- [9] Apartado 2.5
- [20] [21] [22] Apartado 2.8

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

3. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

En este capítulo se plantea el fundamento de los métodos de cálculo empleados para determinar la velocidad de mínima fluidización del lecho, particularizando para los lechos de gas-sólido. Se comienza por introducir el principio hidrodinámico de los lechos fluidizados, enfocándolo hacia una correlación teórica con la que hallar la velocidad de mínima fluidización. A continuación, se enuncian los dos métodos experimentales empleados para calcular dicha velocidad: el método de la pérdida de carga en el lecho y el método de la desviación típica de las fluctuaciones de presión, medidas durante la operación.

3.1. Fundamentos hidrodinámicos de la fluidización

Un gas que se mueve en sentido ascendente a través de un lecho fijo de partículas experimenta una pérdida de carga, debida a la resistencia por fricción, que aumenta con el incremento de su velocidad. No obstante, se alcanza un punto donde el empuje que el gas ejerce sobre las partículas se iguala con el peso aparente de éstas en el lecho. En este punto las partículas se encuentran sustentadas por el gas, de modo que la separación entre ellas aumenta y el lecho comienza a fluidizar.

Por lo tanto, el comienzo de la fluidización está asociado a una pérdida de carga del gas a lo largo del lecho que es igual al peso aparente de todas sus partículas, por unidad de área de lecho perpendicular a la dirección del peso. En general se puede escribir:

$$\text{pérdida de carga en el lecho} = \frac{\text{peso aparente de las partículas del lecho}}{\text{sección transversal del lecho}}$$

En efecto, suponiendo un lecho de partículas de densidad ρ_p , con una altura L en un depósito de sección transversal A , siendo ε la fracción de vacío y ρ_g la densidad del gas fluidizante, se define la pérdida de carga a través de éste como:

$$\Delta p = \frac{(\rho_p - \rho_g)LA(1 - \varepsilon)g}{A} \quad (3.1)$$

Simplificando la Ecuación (3.1), se tiene:

$$\Delta p = (\rho_p - \rho_g)L(1 - \varepsilon)g \quad (3.2)$$

Generalmente, la pérdida de carga medida a través del lecho evoluciona con la velocidad superficial del gas de forma muy similar a la mostrada en la gráfica de la Figura 3.1. La curva tiene diferente forma según si se varía la velocidad del gas en sentido ascendente (O'ABC) o descendente (ODC), presentando una pequeña histéresis. El hecho de existir mayor pérdida de carga en el tramo O'AB de la curva tomada en sentido ascendente se debe a la necesidad de vencer las fuerzas de atracción entre las partículas del lecho, cuando se incrementa paulatinamente la velocidad del gas desde cero. En la curva de sentido descendente no se da este comportamiento pues se parte del estado de lecho fluidizado, habiéndose vencido por tanto esas fuerzas entre partículas.

El incremento de pérdida de carga en el tramo O'AB es más pronunciado en partículas con elevada relación de compactación.

En cualquier caso (sentido ascendente o descendente), se observan dos tramos bien diferenciados: un tramo definido por los segmentos O'A/OD, que corresponde al estado de lecho fijo, donde la pérdida de carga aumenta con la velocidad superficial del gas; otro tramo determinado por los segmentos BC/DC, para el estado de lecho fluidizado, donde la pérdida de carga permanece constante frente al aumento de velocidad del gas.

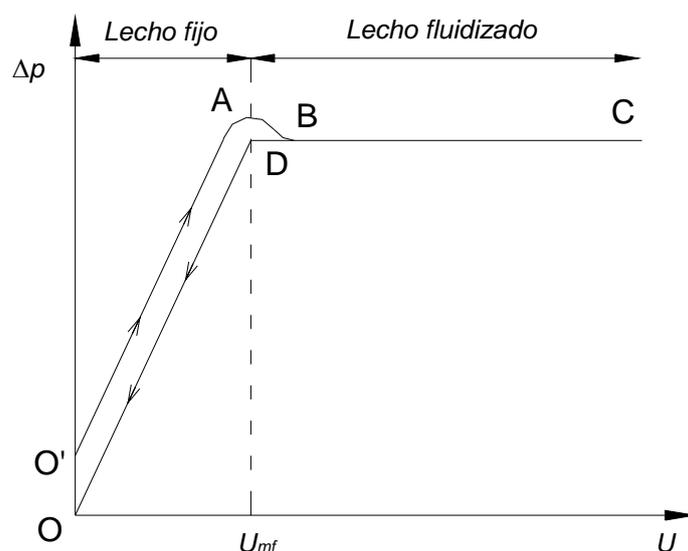


Figura 3.1. Evolución de la pérdida de carga en el lecho Δp con respecto de la velocidad superficial del gas U [3].

Como se ha dicho, los tramos BC/DC definen el comportamiento del lecho en estado fluidizado y en ellos es aplicable la Ecuación (3.2). Por otra parte, los tramos O'A/OD corresponden al lecho fijo, donde el movimiento relativo entre las partículas es nulo y su separación permanece constante. En este tramo, la relación entre la pérdida de carga y la velocidad del gas se determina mediante la expresión propuesta por Ergun [6] (Ecuación (3.3)).

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{\mu_g U (1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} + 1.75 \frac{\rho_g U^2 (1-\varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad (3.3)$$

$\left[\begin{array}{c} \text{componente} \\ \text{laminar} \end{array} \right]$

$\left[\begin{array}{c} \text{componente} \\ \text{turbulenta} \end{array} \right]$

Siendo U la velocidad superficial del gas, μ_g su viscosidad dinámica y d_p el diámetro de partícula en un lecho con fracción de vacío en estado fijo, ε .

La ecuación de Ergun se obtuvo de manera experimental en un amplio rango de tamaños y formas de partícula, reflejando las componentes laminar y turbulenta del gradiente de presión. En condiciones de flujo laminar domina el primer término de la ecuación y, entonces, la pérdida de carga aumenta de forma lineal con la velocidad

superficial del gas y es independiente de su densidad. En condiciones de flujo turbulento domina el segundo término y la pérdida de carga aumenta con el cuadrado de la velocidad, siendo ahora independiente de la viscosidad del gas. En términos del número de Reynolds (Ecuación (3.4)) se considera flujo completamente laminar cuando $Re < 10$ y flujo completamente turbulento para $Re > 2000$. Pero en la práctica, se utiliza generalmente la expresión de Ergun para determinar la pérdida de carga en el lecho fijo para todo el rango de condiciones de flujo, sin atender al régimen en que se esté evaluando; en este estudio se seguirá dicha consideración.

$$Re = \frac{U d_p \rho_g}{(1 - \varepsilon) \mu_g} \quad (3.4)$$

3.2. Cálculo teórico de la velocidad de mínima fluidización

La velocidad de mínima fluidización, U_{mf} , es la velocidad superficial del gas a la que el lecho comienza a fluidizar. Experimentalmente, se ha comprobado que esta velocidad es dependiente del tamaño y la densidad de las partículas del lecho, de las propiedades del gas fluidizante, y de las condiciones de presión y temperatura en las que se lleva a cabo el proceso.

La velocidad de mínima fluidización define el paso del estado de lecho fijo al de lecho fluidizado. De este modo, es posible obtener una expresión para su cálculo igualando la expresión de pérdida de carga en el lecho fijo (Ecuación (3.3)), particularizada para las condiciones de mínima fluidización, con la expresión de pérdida de carga en el lecho fluidizado (Ecuación (3.2)). Así, se obtiene:

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g U_{mf}}{d_p^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g U_{mf}^2}{d_p} \quad (3.5)$$

La Ecuación (3.5) permite determinar la velocidad de mínima fluidización, conocidas las propiedades de las partículas y del fluido, además de la fracción de vacío del lecho. Esta expresión se puede escribir en función del número adimensional de Reynolds, que evalúa el movimiento entre el fluido y la partícula en función de la velocidad de éste, y el número adimensional de Arquímedes, que valora la interacción entre fluido y partícula en función de la diferencia de sus densidades.

De esta forma, multiplicando y dividiendo por $\frac{\mu_g^2}{\rho_g d_p^3}$ se tiene:

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g^2}{\rho_g d_p^3} \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu_g} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g^2}{\rho_g d_p^3} \frac{U_{mf}^2 d_p^2 \rho_g^2}{\mu_g^2} \quad (3.6)$$

Que se puede escribir del siguiente modo:

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \frac{\rho_g d_p^3}{\mu_g^2} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{mf} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 \quad (3.7)$$

Donde Re_{mf} es el número de Reynolds en el comienzo de la fluidización:

$$Re_{mf} = \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu_g} \quad (3.8)$$

Finalmente, la Ecuación (3.7) se puede escribir como se muestra a continuación:

$$Ar = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{mf} + 1.75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 \quad (3.9)$$

Siendo Ar el número de Arquímedes:

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu_g^2} \quad (3.10)$$

Observando el desarrollo anterior se tiene que el cálculo de la velocidad de mínima fluidización pasa por conocer las características de las partículas (densidad ρ_p y diámetro d_p) y del fluido (densidad ρ_g y viscosidad μ_g) durante la operación. Además, es preciso saber el valor de la fracción de vacío al comienzo de la fluidización, ε_{mf} , parámetro que resulta complejo de determinar con exactitud y que, en la práctica, se aproxima al valor de la fracción de vacío en el lecho fijo, ε .

3.3. Cálculo experimental de la velocidad de mínima fluidización a partir de la pérdida de carga en el lecho

Aparte del método de cálculo propuesto por Ergun se plantea un método empírico, que se apoya igualmente en el análisis de los estados de lecho fijo y lecho fluidizado. El proceso consiste en realizar una serie de medidas experimentales de la pérdida de carga en el lecho para valores variables de la velocidad superficial del gas, en un rango que va desde el régimen de lecho fijo hasta el de lecho fluidizado. Se establece la dependencia entre las dos variables, debiendo presentar la curva un comportamiento similar al de la gráfica en la Figura 3.1. La velocidad de mínima fluidización es la que corresponde a la intersección entre las rectas de pérdida de carga en los regímenes de lecho fijo y lecho fluidizado. No obstante, es común determinar la velocidad de mínima fluidización a partir de la intersección entre la recta de lecho fijo y la ordenada correspondiente al peso de las partículas entre la sección transversal del lecho (Figura 3.2).

Así, a partir de la recta de pérdida de carga frente a velocidad en el lecho fijo:

$$\Delta p = a + bU \quad (3.11)$$

Donde los parámetros a y b se pueden determinar por análisis de regresión lineal.

Y con la ordenada correspondiente a la relación entre el peso de las partículas del lecho y la sección transversal de éste:

$$\Delta p = \frac{m_b g}{A} \quad (3.12)$$

De la intersección de ambas rectas se obtiene la velocidad de mínima fluidización:

$$U_{mf} = \frac{\frac{m_b g}{A} - a}{b} \quad (3.13)$$

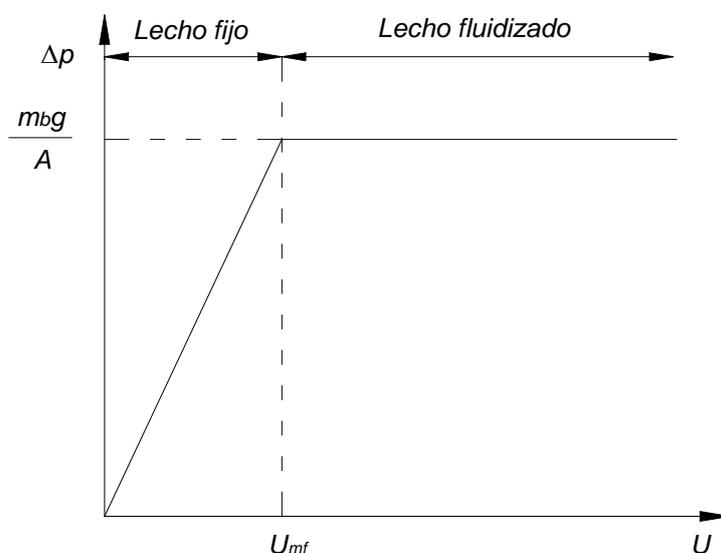


Figura 3.2. Cálculo de la velocidad de mínima fluidización U_{mf} a partir de la pérdida de carga en el lecho Δp .

Este método permite determinar la velocidad de mínima fluidización de forma sencilla, sin necesidad de conocer la fracción de vacío del lecho al comienzo de la fluidización, que es difícil de hallar con precisión. Basta con realizar medidas de la pérdida de carga a distintas velocidades del gas fluidizante, no siendo necesario conocer la densidad o la geometría de las partículas y las propiedades del gas. La variación de la velocidad superficial del gas se hace en sentido descendente, para evitar el posible incremento de pérdida de carga debido a las fuerzas de atracción entre partículas (tramo O'AB en la Figura 3.1).

Pero el empleo de este método lleva asociada una peculiaridad por la que, en ciertas ocasiones, puede resultar poco útil. Ésta consiste en la necesidad de tomar medidas en los estados tanto de lecho fijo como de lecho fluidizado, lo que obliga a detener la fluidización. Por ello, resulta inapropiado en ciertas aplicaciones donde la velocidad de mínima fluidización puede variar con el tiempo debido a cambios en la temperatura de operación o la granulometría y la densidad de las partículas; tal es el caso de los reactores de lecho fluidizado circulante.

La necesidad de detener la operación para definir la velocidad de mínima fluidización, junto con la dificultad para determinar con exactitud la complicada zona de transición entre los dos estados, hace conveniente el planteamiento de un método alternativo.

3.4. Cálculo experimental de la velocidad de mínima fluidización a partir de las fluctuaciones de presión en el lecho

Un grupo de investigadores, Puncochar et al. [4], proponen un nuevo método experimental para el cálculo de la velocidad de mínima fluidización en lechos fluidizados de gas-sólido, basado en el análisis de las fluctuaciones de presión en el lecho. Su trabajo demuestra que la desviación típica de las fluctuaciones de presión, σ_p , es aproximadamente una función lineal de la velocidad superficial del gas.

El método en cuestión consiste en medir las fluctuaciones de presión en el lecho durante el estado fluidizado. La existencia de fluctuaciones de presión notables (se entiende por notables las que son de un orden próximo al de la presión medida en el lecho) está asociada a la formación y ascenso de burbujas por el lecho. Como se comentaba en el Apartado 2.5, para las partículas pertenecientes a los grupos B y D de la clasificación de Geldart, la aparición de burbujas tiene lugar justo en el momento en que éstas comienzan a fluidizar, es decir se cumple que la velocidad de mínima fluidización es igual a la de mínimo burbujeo. Por lo tanto, en el caso de partículas pertenecientes a dichos grupos, es posible determinar la velocidad de mínima fluidización como aquella en la que aparece el burbujeo y, en efecto, comienzan a registrarse valores de la desviación típica de las fluctuaciones de presión mayores que cero. En este estudio se ensayan partículas del grupo B, con lo que se aplica este método para hallar la velocidad de mínima fluidización.

En la Figura 3.3 se representa la dependencia lineal entre la desviación típica de las fluctuaciones de presión y la velocidad superficial del gas fluidizante. La ecuación de la recta es de la forma:

$$\sigma_p = a + bU \quad (3.14)$$

Donde los parámetros a y b se pueden determinar por análisis de regresión lineal.

Considerando que las fluctuaciones de presión en el lecho aparecen a velocidades del gas mayores que la de mínima fluidización, a partir de la Ecuación 3.14 se obtiene:

$$U_{mf} = -\frac{a}{b} \quad (3.15)$$

Resultando U_{mf} de la intersección de la línea de tendencia de las fluctuaciones de presión con el eje de velocidades, donde $\sigma_p = 0$.

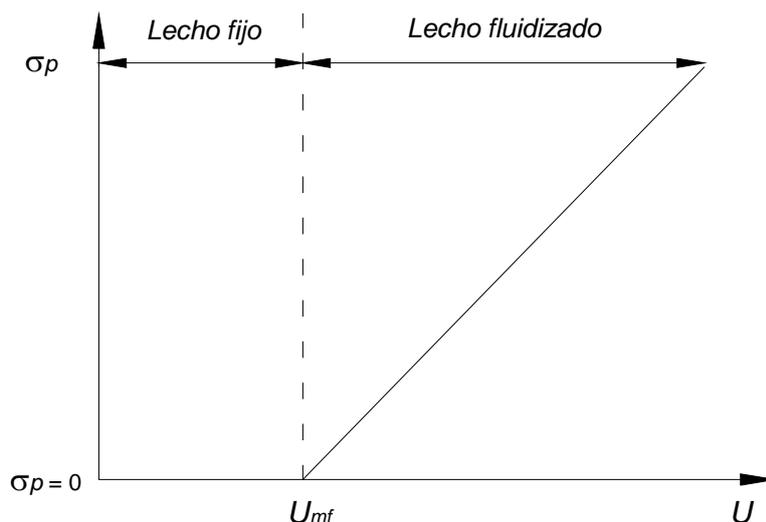


Figura 3.3. Cálculo de la velocidad de mínima fluidización U_{mf} a partir de la desviación típica de las fluctuaciones de presión σ_p .

Una manera de interpretar el fundamento de este método, y por tanto de las Ecuaciones (3.14) y (3.15), es a partir del concepto de energía mecánica del movimiento vibratorio de las partículas en el lecho fluidizado. La energía mecánica media de las partículas por unidad de volumen del lecho, a una velocidad del gas superior a la de mínima fluidización, se puede expresar de manera general como:

$$\bar{E}(U) = \bar{E}(U_{mf}) + E^* \quad (3.16)$$

Donde E^* es la contribución de energía debida a las irregularidades asociadas al estado fluidizado. La experiencia demuestra que la energía mecánica media es proporcional a la velocidad superficial del gas, con lo que se puede escribir:

$$\bar{E}(U) = k_1 U \quad (3.17)$$

Donde k_1 es un parámetro complejo, función de las propiedades de las partículas y las condiciones de operación.

Suponiendo un régimen en el que todas las partículas se mueven en fase con el fluido, y por tanto a la misma frecuencia, es posible pensar que la energía debida a las irregularidades depende de las fluctuaciones de presión:

$$E^* = k_2 \sigma_p \quad (3.18)$$

Donde k_2 es otro parámetro dependiente de las condiciones de operación.

Combinando las Ecuaciones (3.16), (3.17) y (3.18) se puede obtener una interpretación física de la Ecuación (3.14):

$$k_1 U = k_1 U_{mf} + k_2 \sigma_p; \quad \sigma_p = -\frac{k_1}{k_2} U_{mf} + \frac{k_1}{k_2} U \quad \left\{ \begin{array}{l} a = -\frac{k_1}{k_2} U_{mf} \\ b = \frac{k_1}{k_2} \end{array} \right.$$

En conclusión, este método permite determinar la velocidad de mínima fluidización sin necesidad de conocer las propiedades de las partículas o del fluido. Además se aplica sobre el lecho en estado fluidizado, lo que resulta práctico en procesos en los que no se puede detener la fluidización. El análisis consiste en calcular la desviación típica de las fluctuaciones de presión medidas en el lecho para distintos valores de la velocidad superficial del gas de entrada. La velocidad para la cual se registran valores nulos de la desviación típica de las fluctuaciones es la velocidad de mínimo burbujeo que, en el caso de partículas de los grupos B y D de la clasificación de Geldart, se corresponde con la velocidad de mínima fluidización.

Referencias bibliográficas Capítulo 3

- [1] [2] Apartados 3.1, 3.2, 3.3
- [3] [6] Apartado 3.1
- [4] [5] [10] [11] [12] Apartado 3.4

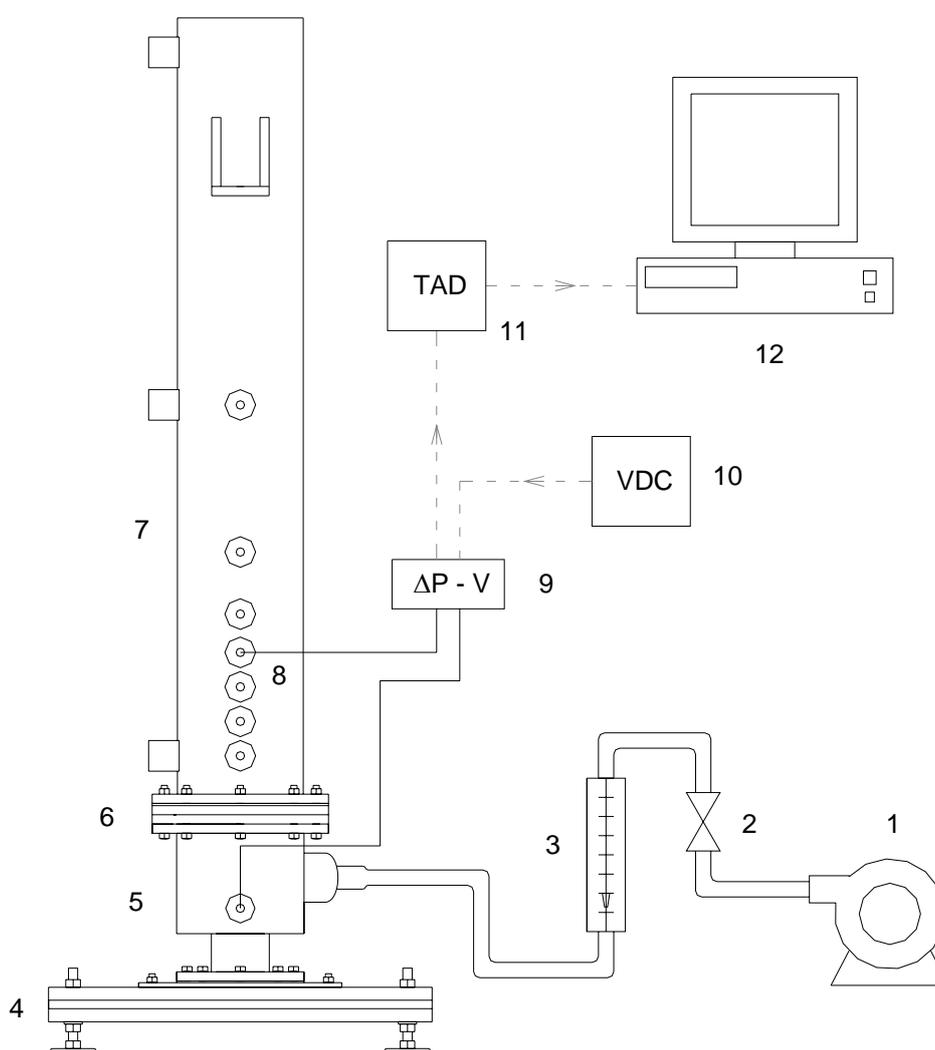
CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

En este capítulo se describe la instalación en la que se lleva a cabo el estudio. Los distintos elementos que la componen se pueden agrupar en: lecho, partículas sometidas a fluidización, sensores y transductores de presión, y sistema de adquisición de datos. La Figura 4.1 muestra un esquema de la instalación.

Fundamentalmente, el ensayo consiste en fluidizar mediante aire un lecho de partículas y realizar, con la ayuda de sensores, una serie de medidas de presión que se recogen en un transductor donde se transforman en señales de tensión. Estas señales se transfieren mediante un sistema de adquisición de datos a un ordenador personal, donde se almacenan y tratan con el fin de obtener los valores que permitan caracterizar el comportamiento de las partículas en el lecho.



- | | | |
|-----------------------|----------------------|----------------------------|
| 1. Compresor de aire | 5. Plenum | 9. Transductor de presión |
| 2. Llave de paso | 6. Distribuidor | 10. Fuente de alimentación |
| 3. Rotámetro | 7. Columna del lecho | 11. Tarjeta de adquisición |
| 4. Bastidor del lecho | 8. Sensor de presión | 12. Ordenador personal |

Figura 4.1. Esquema de la instalación experimental.

4.1. Descripción del lecho

En este apartado se describe el lecho donde se lleva a cabo el ensayo; la Figura 4.2 muestra una imagen del mismo. En el apartado Anexo A.1 se encuentran los planos que detallan la estructura del conjunto.



Figura 4.2. Lecho donde se realiza el ensayo.

El lecho consta de una columna donde se alojan las partículas durante la operación. La columna es transparente, hecha de metacrilato, con geometría cilíndrica de diámetro interior $D = 0.150$ m y altura $H = 1.025$ m. La fluidización de las partículas tiene lugar en condiciones de presión y temperatura ambiente, y se lleva a cabo mediante aire que se introduce a través de un distribuidor situado en la parte inferior de la columna. El distribuidor está formado por dos platos de 12 mm de espesor cada uno: el primero, colocado en la parte inferior y fabricado en aluminio, tiene orificios de diámetro 6 mm; el segundo, que se sitúa por encima del primero e inmediatamente por debajo de la columna del lecho, es de metacrilato y tiene orificios de 3 mm de diámetro. Los orificios de los platos se disponen en filas paralelas, formando una matriz de perímetro

cuadrangular con 0.130 m de lado aproximadamente. La relación de área libre del distribuidor define el cociente entre la superficie de todos los orificios de distribución y la sección interna de la columna del lecho. La relación de área libre en este caso, referida al distribuidor superior, es del 4.4 %.

Por debajo del primer plato distribuidor existe una cavidad de metacrilato y forma cilíndrica, llamada plenum, con un orificio por el que se introduce el aire procedente de la red, y dispuesta con el fin de conseguir un flujo de aire lo más homogéneo posible hacia el elemento distribuidor. El plenum tiene un tramo (justo en la unión con el distribuidor) con diámetro interior de 0.154 m y altura de 0.131 m, y otro tramo (por debajo del cual se encuentra la base del lecho) con diámetro interior de 0.063 m y altura de 0.074 m.

La columna del lecho se fija a los platos distribuidores y al plenum mediante un juego de 8 tornillos pasantes. Entre los diferentes elementos se colocan juntas de polímero para eliminar las fugas del aire de fluidización. En la parte superior del segundo distribuidor se coloca una malla fina para evitar la posible caída hacia el plenum de las partículas a fluidizar.

El conjunto se une por la parte inferior del plenum a una base de aluminio de sección cuadrada con 0.265 m de lado y 6 mm de espesor. La unión se hace mediante 8 tornillos, con junta de polímero en medio para evitar fugas de aire. Asimismo la base se fija en una estructura construida con perfiles de aluminio de sección $0.045 \times 0.045 \text{ m}^2$, apoyada en cuatro patas de caucho con una distancia entre centros de patas de 0.455 m.

Como se menciona anteriormente, el plenum tiene un orificio por el que se suministra el aire de fluidización, situado a 0.135 m sobre su base. Además, existe otro orificio para colocar un sensor de presión con el que tomar medidas en esta cavidad, situado 0.040 m por debajo del orificio de entrada de aire.

Otros 7 orificios para fijar los sensores de presión, de las mismas características que el del plenum y alineados con él, se colocan en la columna del lecho a una altura sobre su base de 0.062 m, 0.107 m, 0.152 m, 0.197 m, 0.247 m, 0.328 m y 0.520 m respectivamente. Existen en la columna otros tres orificios más, situados a 90° con respecto a los anteriores, y a una altura sobre la base del plenum de 0.062 m, 0.520 m y 0.980 m. No en todos los orificios será necesario colocar sensores, de acuerdo con los objetivos de análisis de este estudio, de modo que se dispone de tapones metálicos para cerrar aquéllos que puedan quedar libres.

Para abastecer el lecho de aire se dispone de una red de aire comprimido, con capacidad para diferentes servicios, cuya presión se puede controlar mediante una válvula reguladora. El caudal se ajusta mediante un rotámetro de lectura directa, situado en la entrada al plenum, con rango de medida de 0 – 1400 l/min. Inmediatamente antes del rotámetro existe una llave de paso con la que se impide el suministro a la instalación de lecho fluidizado.

Un modo de caracterizar el lecho es a partir de la pérdida de presión que sufre el aire al pasar por su interior. De entre todos los factores que pueden producir pérdida, el más importante es el elemento distribuidor, donde existe una gran disminución del área de paso. La columna, aunque es el elemento de más longitud, tiene sección constante y una

pared con baja rugosidad, por lo que se puede considerar despreciable la pérdida de presión en ella, en comparación con la del distribuidor. Por las mismas razones, la pérdida en el plenum resulta igualmente despreciable. Así, se evalúa la pérdida en el lecho midiendo el incremento de presión en el aire a su paso por el distribuidor; en el Apartado 6.1 se muestra el resultado.

4.2. Descripción de las partículas de fluidización

El estudio de caracterización hidrodinámica se repite con dos tipos de partículas: partículas de arena de sílice y microesferas de vidrio. Los dos tipos pertenecen al Grupo B de la clasificación de Geldart (Apartado 2.5) de modo que se identifican por un comienzo del burbujeo al inicio de la fluidización (recordar que en este caso las velocidades de mínima fluidización y mínimo burbujeo coinciden), una expansión del lecho moderada y sin chorros (excepto en lechos poco profundos), y un crecimiento de las burbujas sin límite de tamaño (sólo el asociado al diámetro del lecho).

A pesar de pertenecer al mismo grupo en cuanto a comportamiento, los dos tipos de partículas presentan distintos valores del diámetro de partícula medio d_p y la densidad de partícula ρ_p (Tabla 4.1) con lo que se prevé obtener diferencias en la velocidad de mínima fluidización.

Resulta complejo determinar el valor del diámetro de partícula pues los tamaños de las partículas varían, con diámetros de entre 600 y 900 μm en la arena de sílice y entre 400 y 800 μm en las microesferas de vidrio. Para definir un valor aproximado del diámetro de partícula se visualiza mediante un microscopio electrónico una muestra de los dos tipos de partículas, ajustando el diámetro de cada partícula mediante la comparación con una medida de referencia que ofrece el aparato. El valor apreciado es de $d_p = 700 \mu\text{m}$ para las partículas de arena y $d_p = 600 \mu\text{m}$ para las microesferas de vidrio. En el Anexo A.2 aparecen las imágenes obtenidas con el microscopio en cada caso.

Las partículas empleadas, tanto de arena como de vidrio, se caracterizan por presentar una superficie lisa y sin poros. Por ello, es apropiado el uso de un picnómetro para determinar el valor de la densidad de partícula. Se emplea un aparato de este tipo en la medida, obteniéndose un valor de $\rho_p = 2.651 \text{ g/cm}^3$ para la arena y $\rho_p = 2.489 \text{ g/cm}^3$ para las microesferas de vidrio. En el Anexo A.3 se muestra la lectura del picnómetro en los dos casos.

Además de realizarse el experimento con los dos tipos de partículas mencionados, se varía la altura inicial de las partículas en el lecho, o altura de lecho fijo, L . Las alturas ensayadas son $L = 0.150 \text{ m}$ ($L/D = 1$) y $L = 0.225 \text{ m}$ ($L/D = 1.5$). El volumen de las partículas en el lecho, o volumen aparente (Ecuación (4.1)), es de $V_{ap} = 2650 \text{ cm}^3$ para una altura $L/D = 1$ y $V_{ap} = 3975 \text{ cm}^3$ para una altura $L/D = 1.5$. La masa del lecho de partículas en las diferentes configuraciones es: $m_b = 4.20 \text{ kg}$ para $L/D = 1$ y $m_b = 6.30 \text{ kg}$ para $L/D = 1.5$ en las partículas de arena; $m_b = 4.10 \text{ kg}$ para $L/D = 1$ y $m_b = 6.15 \text{ kg}$ para $L/D = 1.5$ en las microesferas de vidrio.

$$V_{ap} = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (4.1)$$

Aplicando la Ecuación (2.2) se calcula la densidad aparente del lecho. El valor que se obtiene es $\rho_b = 1.585 \text{ g/cm}^3$ para las partículas de arena y $\rho_b = 1.547 \text{ g/cm}^3$ para las microesferas de vidrio.

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \quad (2.2)$$

Conocidas las densidades de partícula y del lecho en los dos casos, es posible aproximar el valor de la fracción de vacío, según la Ecuación (2.4). Así, se tiene $\varepsilon = 0.402$ para las partículas de arena y $\varepsilon = 0.378$ para las microesferas de vidrio.

$$\rho_b = (1 - \varepsilon)\rho_p \quad (2.4)$$

Partícula \ Propiedad	d_p (μm)	ρ_p (g/cm^3)	ρ_b (g/cm^3)	ε
Arena de sílice	700	2.651	1.585	0.402
Microesferas de vidrio	600	2.489	1.547	0.378

Tabla 4.1. Propiedades de las partículas ensayadas.

4.3. Descripción de los sensores y transductores de presión

Las medidas de presión se realizan en la columna del lecho y en el plenum. Las señales físicas de presión se recogen mediante sensores que se colocan a las alturas elegidas, roscados en unos soportes de metacrilato de diámetro y longitud 40 mm. Cada sensor se compone de un tubo de acero inoxidable con diámetro interior de 2 mm y longitud 30 mm, montado sobre un racor macho de ¼ pulgadas NPT, que se une a un tubo de silicona con diámetro interior de 4 mm. Este tubo es el medio por el cual viaja la señal física de presión, desde el sensor hasta el transductor. En la Figura 4.3 se muestra un esquema del sensor de presión.

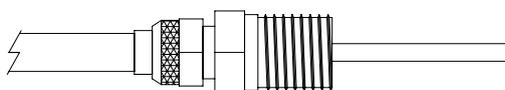


Figura 4.3. Sensor de presión.

Los transductores son de tipo diferencial y ofrecen una señal eléctrica, en términos de tensión, que es proporcional a la diferencia de presión medida entre sus dos puertos. En los experimentos realizados se usan estos transductores para tomar medidas de presión absoluta, de modo que se conecta el puerto de alta presión al punto del lecho en el que se desea medir y el de baja presión se deja libre a la atmósfera. No obstante, se realiza una medida diferencial para hallar la pérdida de carga en el lecho, con el puerto de alta presión conectado a la parte inferior del lecho y el de baja presión a la parte superior.

4.3.1. Consideraciones generales sobre transductores de presión

Existen algunas consideraciones que se deben observar a la hora de elegir los transductores de presión con los que realizar las medidas. Las más importantes son:

- Rango de medida. Define los límites inferior y superior de diferencia de presión que puede medir el transductor entre sus dos puertos. Generalmente se expresa en unidades de pulgada de columna de agua (una pulgada de columna de agua equivale a 250 Pa aproximadamente).
- Tensión de entrada (excitación). Se refiere a los límites inferior y superior de tensión con que se debe alimentar el transductor para que la señal eléctrica de salida se corresponda con la señal física de entrada.
- Tensión de salida. Indica los límites inferior y superior de tensión en la señal de salida del transductor que se corresponden con los valores inferior y superior del rango de presión detectable por el transductor.
- Función de transferencia. Define la relación entre la señal de presión medida y la señal de tensión entregada por el transductor. En el caso de los transductores de presión utilizados en este trabajo, la relación entre presión medida y señal de salida es lineal.
- Parámetros zero y span. Los transductores de presión empleados permiten ajustar manualmente el cero (zero) y el fondo de escala (span).

4.3.2. Transductores de presión empleados

Se dispone de cinco transductores de presión piezoresistivos para realizar las medidas: tres unidades de transductor modelo Setra 267-10" y dos unidades de transductor modelo Omega PX291-030W. En la Tabla 4.2 se indican sus características.

Característica \ Modelo	Setra 267-10"	Omega PX 291-030W
Rango de medida (pulgadas de columna de agua (Pa))	0 – 10 (0 – 2500)	0 – 30 (0 – 7500)
Tensión de entrada (V en continua)	12 – 40	11 – 32
Tensión de salida (V en continua)	0.05 – 5.05	0 – 5
Función de transferencia (Pa)	$\Delta p = 500 \cdot V - 25$ (4.2)	$\Delta p = 1500 \cdot V$ (4.3)
Precisión (% sobre el fondo de escala)	1	1

Tabla 4.2. Características de los transductores.

Los transductores se alimentan con una fuente de tensión de continua, conectando respectivamente las salidas positiva y negativa de la fuente con los terminales de excitación y tierra del transductor. La diferencia de potencial suministrada a los transductores durante el ensayo se encuentra en un rango aproximado de 13.7 – 14 V en continua. Para ello se emplea una fuente con tensión de salida regulable entre 3 y 15 V en continua (tensión de entrada 230 V en alterna a 50 Hz).

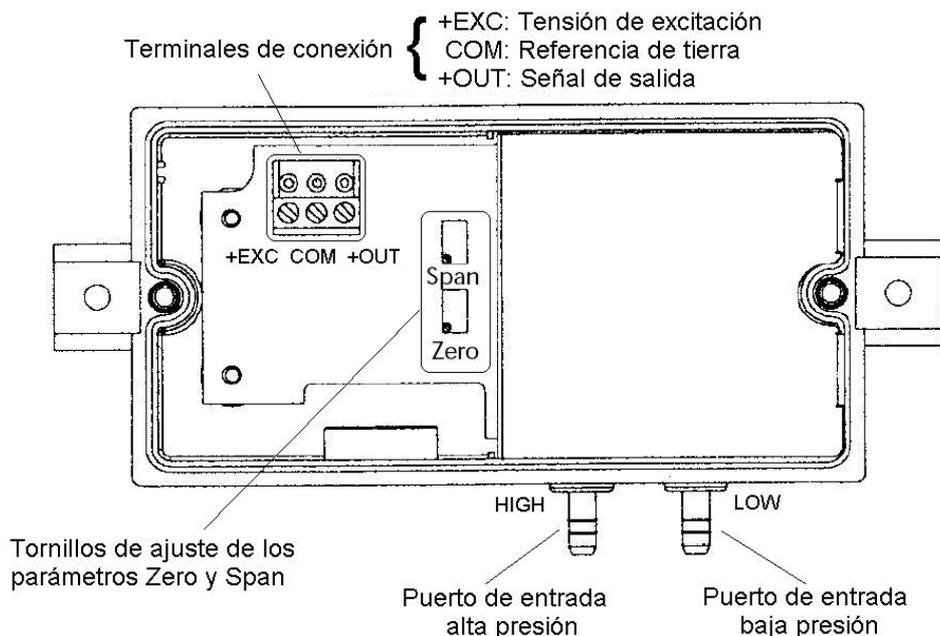


Figura 4.4. Esquema del transductor de presión Setra 267-10'' [23].

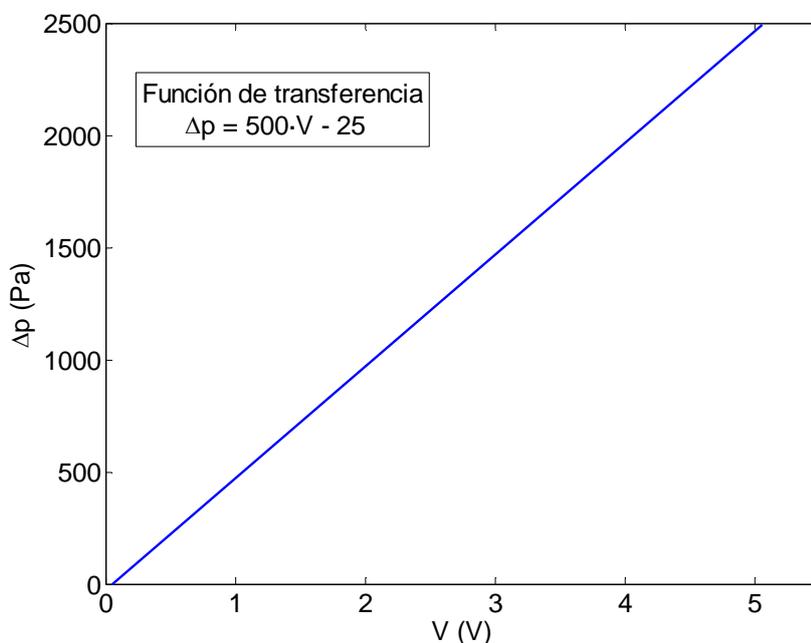


Figura 4.5. Relación entre la diferencia de presión medida Δp y la señal de salida V . Transductor de presión Setra 267-10''.

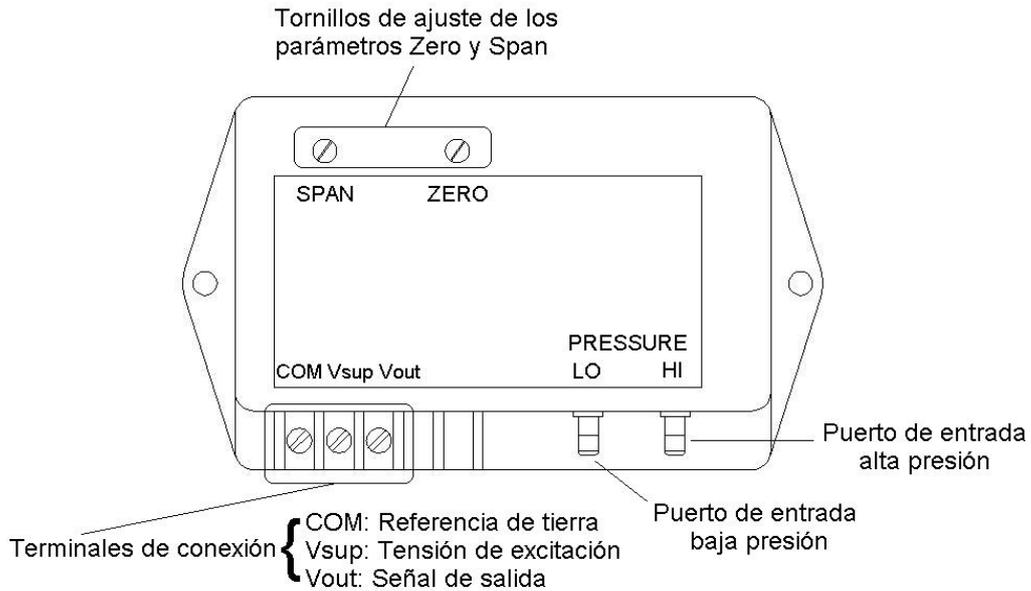


Figura 4.6. Esquema del transductor de presión Omega PX291-030W [24].

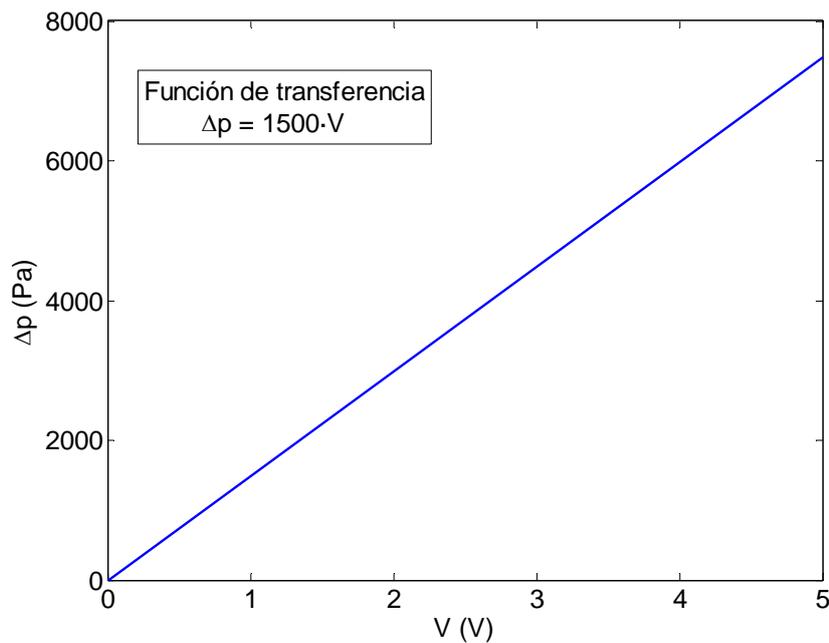


Figura 4.7. Relación entre la diferencia de presión medida Δp y la señal de salida V . Transductor de presión Omega PX291-030W.

En el Apartado 5.1 se indican los distintos puntos del lecho en que se conectan los transductores, según la configuración de altura de llenado a ensayar, así como el modo de conexión de sus dos puertos.

4.4. Descripción del sistema de adquisición de datos

Con el fin de obtener resultados relevantes es necesario tratar grandes cantidades de información con una elevada velocidad de procesamiento, por lo que esta tarea se lleva a cabo mediante un ordenador personal (PC). Para adquirir señales el ordenador necesita una tarjeta de adquisición de datos (TAD), componente que hace de interfaz entre el PC y el elemento generador de señales eléctricas.

Entre el sensor y el transductor la señal de presión es de tipo físico. En el transductor la señal pasa a ser de tipo eléctrico, en modo analógico. La TAD recibe la señal eléctrica analógica desde el transductor y la convierte en modo digital, de manera que pasa a ser procesable por el PC. En ciertas ocasiones, las señales eléctricas generadas por los transductores no son adecuadas o no son compatibles con las características de entrada de una determinada TAD. En estos casos se hace necesario el uso de dispositivos de acondicionamiento de señal que realizan un tratamiento previo de ésta, siendo sus funciones más usuales las de amplificación, filtrado, linealización o aislamiento eléctrico.

4.4.1. Consideraciones generales sobre tarjetas de adquisición de datos

A continuación se enumeran diferentes aspectos que caracterizan una TAD y se deben tener en cuenta según la aplicación en que se vaya a utilizar:

- Entradas analógicas. Se refiere al número de canales analógicos de entrada que tiene la TAD. El número de canales se ha de especificar tanto para entradas referenciadas a tierra como para diferenciales.

En las entradas referenciadas a tierra (también single-ended inputs) es posible que entre el terminal de referencia y tierra exista una diferencia de potencial, denominada tensión en modo común, que es la causa de algunos errores de medida. Esta configuración se utiliza en señales de alto nivel donde el error introducido por la señal en modo común es despreciable.

En las entradas diferenciales (también differential inputs) se emplean los dos terminales de entrada de cada canal de la TAD, de modo que no existe ningún terminal referenciado a masa. Esta configuración es apropiada para adquisición de señales de bajo nivel, pues con ella se elimina la tensión en modo común.

- Frecuencia de muestreo. Indica la velocidad a la que se produce la conversión analógico-digital. Una frecuencia de muestreo elevada proporciona señales de entrada con mayor calidad de definición en el tiempo, aumentando al mismo tiempo el flujo de datos hacia el procesador.
- Resolución. Hace referencia al número de bits que utiliza el conversor analógico-digital para cuantificar los niveles de la señal analógica de entrada. Cuanto mayor sea el número de bits utilizado por el conversor, mayor será el número de niveles de señal que se puede representar.

- Niveles de entrada. Son los límites de entrada de tensión de la TAD. Se distingue entre modo unipolar, que admite únicamente niveles de tensión positivos, y modo bipolar, que permite las dos polaridades. Para disponer del máximo de resolución en la medida, el margen dinámico de la señal de entrada debe coincidir con el margen de la TAD.
- Salidas analógicas. Algunas TAD incorporan salidas analógicas, para actuar sobre dispositivos externos desde el PC.
- Puertos digitales. Son líneas de entrada/salida digitales. Se utilizan para control de procesos y comunicación con equipos periféricos. Los parámetros más importantes que caracterizan los puertos digitales son el número de líneas disponibles, la velocidad a la que pueden transferir los datos y la capacidad de control de diferentes dispositivos.
- Temporizadores. Son líneas útiles para diversas aplicaciones como contar las veces que se produce un evento, generar pulsos o bases de tiempos para procesos digitales.

4.4.2. Tarjeta de adquisición de datos empleada

La TAD que se utiliza en el estudio es del fabricante ICP DAS modelo PCI-1602F (Figura 4.8). La tarjeta se inserta en una ranura de expansión para bus PCI del PC y se conecta con una placa de conectores situada en el exterior, donde se pueden realizar con comodidad las conexiones de entrada oportunas. La placa de conectores empleada es el modelo DB-1825 de ICP DAS (Figura 4.9).

La tarjeta PCI-1602F es una tarjeta multifunción de entrada/salida para señales analógicas, digitales y de temporizador, destinada a PCs y ordenadores compatibles con ranuras para bus PCI de 5V. A continuación se describen sus características principales:

- Entradas analógicas. La tarjeta cuenta con 32 canales de entrada analógicos configurables como 32 entradas referenciadas a tierra o 16 entradas diferenciales, con selección mediante jumpers. Los niveles de entrada se pueden fijar en valores de ± 10 V, ± 5 V, ± 2.5 V o ± 1.25 V (modo bipolar). La ganancia se puede programar en 1, 2, 4 y 8.
- Conversor analógico-digital. La tarjeta cuenta con un conversor analógico-digital de 16 bits de resolución y frecuencia máxima de muestreo de 200 kHz.
- Conversor digital-analógico. La tarjeta dispone de dos conversores digital-analógico de 12 bits de resolución (precisión de ± 1 bit) y buffer multifunción. El rango de tensión de salida se puede seleccionar entre ± 10 V o ± 5 V (modo bipolar).
- Entradas/salidas digitales. La tarjeta presenta dos puertos, uno de salida y otro de entrada, de 16 bits compatibles TTL.
- Temporizador/contador. La tarjeta dispone además de tres canales para señales de temporizador/contador de 16 bits, con máxima frecuencia de entrada de 8 MHz.

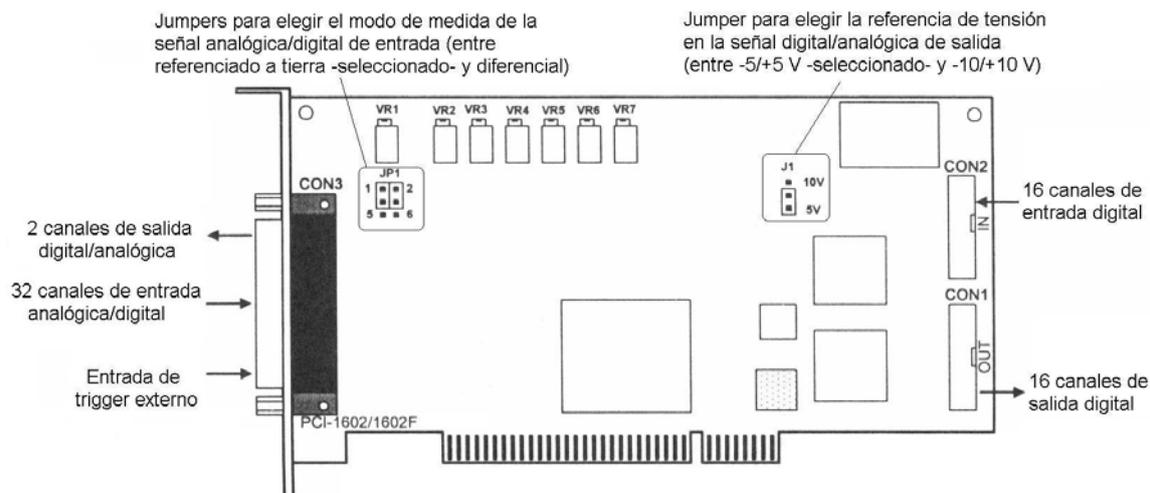


Figura 4.8. Esquema de la TAD PCI-1602F de ICP DAS [18].

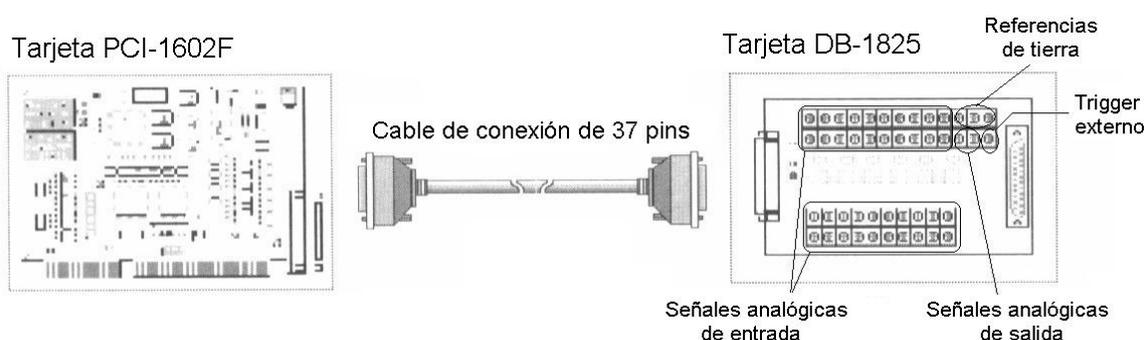


Figura 4.9. Esquema de la placa de conectores DB-1825 de ICP DAS [19].

4.4.3. Configuración del sistema de adquisición de datos

El proceso de adquisición y tratamiento de datos se ejecuta desde el PC. Son varias las operaciones que se llevan a cabo: en primer lugar se realiza la obtención, visualización y registro de datos, mediante un software de adquisición; posteriormente se efectúa el cálculo y análisis de los resultados de interés, a partir de los datos registrados, con un software de cálculo.

En el ensayo se emplea un PC con puerto PCI, compatible con la TAD. El modelo en cuestión utiliza un procesador capaz de funcionar a una velocidad de 1.5 GHz, con memoria RAM de 256 MB y sistema operativo Windows 2000.

El software empleado en la adquisición de los datos es DASyLab, por razones de compatibilidad con el modelo de TAD utilizada y por la sencillez y versatilidad relativas a su uso. DASyLab hace de interfaz entre el usuario y la TAD, permitiendo monitorizar y configurar el proceso de adquisición.

Las señales eléctricas de entrada se reciben en la TAD directamente desde los transductores con conexiones mediante cable unipolar de cobre. El diámetro de los cables es de 1.20 mm y su longitud aproximada de 1.50 m. Debido a que no existen motores ni otras fuentes de ruido en las inmediaciones de la instalación, no se lleva a cabo ningún tipo de acondicionamiento de señal.

Las señales se toman referenciadas a tierra, de modo que se obtiene por cada canal la señal de voltaje de cada transductor con respecto a la referencia de tierra. La referencia de tierra en las señales de entrada de la TAD es la misma que la referencia de la fuente y los transductores. Como se comentaba en el Apartado 4.4.1, al elegir esta configuración hay que tener presente la posibilidad de que aparezca una tensión adicional, que se suele denominar tensión en modo común. La experiencia demuestra que esta tensión es generalmente del orden de milivoltios, por lo que se debe evitar cuando la medida es de señales de bajo nivel [17]. En este caso, por las características de los transductores, las señales adquiridas se hallan en un rango de 0 – 5 V, considerándose despreciable el posible error debido a la tensión en modo común. En relación con el rango de la señal adquirida, se selecciona un nivel de entrada de ± 5 V con el objetivo de conseguir una buena resolución en la medida.

La frecuencia de muestreo se fija en 200 Hz, que es 20 veces superior a la frecuencia en que se producen los fenómenos de interés en lechos fluidizados (suelen tener lugar por debajo de los 10 Hz) [10]. Se elige un tiempo de muestreo de 300 segundos para cada caudal del aire de entrada, salvo en la medida de la pérdida de carga en el distribuidor que se rebajan a 100 segundos, por apreciarse en este caso una señal bastante uniforme. Así, se tienen tamaños de 60000 muestras para cada caudal en las medidas de presión ordinarias y 20000 muestras para cada caudal en las medidas de la pérdida de carga en el distribuidor. En el Apartado 5.1 se detalla el modo en que se toman las medidas.

Referencias bibliográficas Capítulo 4

- [23] [24] Apartado 4.3.2
- [17] Apartados 4.4.1 y 4.4.3
- [18] [19] Apartado 4.4.2
- [10] Apartado 4.4.3

CAPÍTULO 5

MEDIDAS Y CÁLCULOS

5. MEDIDAS Y CÁLCULOS

Este apartado incluye diferentes consideraciones sobre las medidas realizadas (tamaño de muestra, puntos de medida, rango de velocidades del aire de entrada), el modo en que se llevan a cabo las medidas (proceso de adquisición de datos) y las operaciones que se realizan con los datos obtenidos de cara a conseguir los diversos resultados de interés (aplicación de los métodos de cálculo de la velocidad de mínima fluidización).

5.1. Características de las medidas

Las muestras de presión se toman a diferentes velocidades del aire de entrada y en varios puntos, a distintas alturas sobre una misma línea en dirección paralela al eje del lecho. Una muestra o serie de datos recoge la señal procedente de todos los sensores empleados en el ensayo. En la Tabla 5.1 se indica la altura de los puntos de medida.

Punto de medida	z (m)	z/D ()
z_0	0.062	0.41
z_1	0.107	0.71
z_2	0.152	1.01
z_3	0.197	1.31
z_6	0.520	3.47
Plenum	–	–

Tabla 5.1. Puntos de medida de presión. Siendo z : altura del punto por encima del distribuidor; z/D : relación altura del punto a diámetro del lecho ($D = 0.150$ m).

Los puntos donde se recogen las muestras se varían según la altura de lecho ensayada. De este modo, para una altura del lecho de $L = 0.150$ m ($L/D = 1$) se toman medidas en z_0 , z_1 , z_6 y plenum, mientras que con una altura de $L = 0.225$ m ($L/D = 1.5$) se mide en z_1 , z_2 , z_3 , z_6 y plenum. Se utilizan cinco transductores de presión (Apartado 4.3): tres unidades con rango de medida de 0 – 10 pulgadas de columna de agua (0 – 2500 Pa), referidos con la numeración 1, 2 y 3; dos unidades con rango de 0 – 30 pulgadas de columna de agua (0 – 7500 Pa), con numeración 4 y 5. En la Tabla 5.2 y la Figura 5.1 se señala el modo en que se colocan los transductores en los diferentes puntos.

Punto de medida	$L/D = 1$ transductor número	$L/D = 1.5$ transductor número
z_0	1	–
z_1	2	5
z_2	–	2
z_3	–	3
z_6	3	1
Plenum	4	4

Tabla 5.2. Colocación de los transductores en $L/D = 1$ y $L/D = 1.5$.

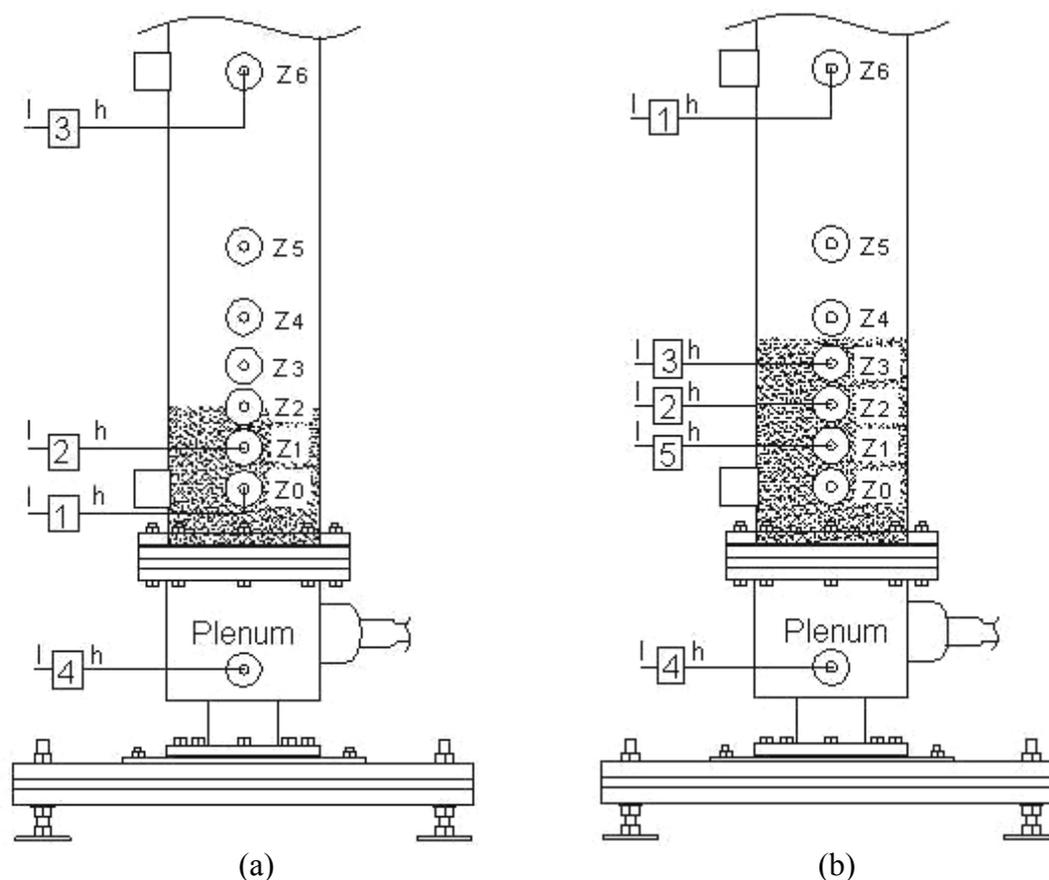


Figura 5.1. Colocación de los transductores: a) $L/D = 1$; b) $L/D = 1.5$.

Recuadrado el número correspondiente de transductor.

Uniones: h: puerto de alta presión; l: puerto de baja presión.

Los transductores empleados son de tipo diferencial, con lo que generan una tensión proporcional al incremento de presión medido entre sus dos puertos. Todas las medidas se toman con la presión atmosférica como referencia, por lo que se conecta el puerto de alta presión al punto de medida y el de baja presión directo al ambiente.

El tamaño de cada serie es de 60000 muestras, el mismo para todos los casos. Según el estudio de Wilkinson [5], para una serie de tamaño superior a 10000 muestras el valor de la desviación típica de las fluctuaciones de presión obtenido se mantiene constante. En el Apartado 6.1 se valora la consistencia de la desviación típica según el número de muestras en el lecho estudiado.

La velocidad del aire de fluidización se varía en sentido descendente, comenzando por un valor máximo hasta llegar a cero. Estudios previos, Puncochar et al. [4], sugieren realizar el ensayo hasta una velocidad máxima del aire de entrada de 2.5 veces la velocidad de mínima fluidización, pues para valores superiores la desviación típica de las fluctuaciones de presión deja de ser lineal con la velocidad. A priori, es difícil concretar el límite superior del rango de velocidades pues se desconoce la velocidad de mínima fluidización. De forma aproximada, se establece un caudal máximo de entre 2 y 2.5 veces superior a aquél en que se puede apreciar de forma visual la aparición de burbujas en el lecho. Tomando una velocidad en que el lecho muestra burbujeo, es seguro que se alcanza la velocidad de mínima fluidización; se recuerda que el burbujeo

aparece a la velocidad de mínima fluidización en partículas del Grupo B de Geldart, en el que se clasifican los dos tipos de partículas ensayadas.

Atendiendo a la consideración anterior, se fluidiza el lecho con un rango de caudales de 1000 – 0 l/min en el ensayo con partículas de arena, que corresponde a un rango de velocidades aproximado de 0.950 – 0 m/s. Para las microesferas de vidrio el rango de caudales es de 700 – 0 l/min, equivalentes a un rango de velocidades de 0.650 – 0 m/s. En principio, la velocidad a la que se aprecia visualmente la aparición de burbujas es muy próxima entre $L/D = 1$ y $L/D = 1.5$ para cada tipo de partículas, por lo que se ensayan las dos alturas en el mismo rango de caudales.

5.2. La adquisición de los datos

La aplicación empleada para adquirir los datos es DASYSLab (versión 7.0). El software trabaja en el entorno de Windows y se basa en una programación gráfica, lo que permite diseñar el proceso de adquisición de forma simple, representándolo mediante un diagrama de bloques. De este modo, se definen las diversas tareas que componen el proceso sin más que insertar diferentes módulos, conectados convenientemente, en una hoja de trabajo. Los módulos simbolizan entradas o salidas, operaciones a realizar con los datos o displays y controles. Las conexiones entre los módulos representan al flujo de datos.

La finalidad del proceso de adquisición es obtener series de datos con el valor de tensión procedente de los transductores, almacenarlos en el PC, transformarlos al valor de presión equivalente y realizar un conjunto de operaciones para hallar ciertos resultados de interés, de cara a evaluar el comportamiento del lecho. DASYSLab dispone de módulos para realizar estas funciones, aparte de muchas otras. Se debe señalar que, con respecto al tratamiento de datos, un programa de adquisición realiza operaciones mientras los datos están siendo adquiridos, resultando complicado operar con ellos posteriormente. En consecuencia, y puesto que además se trabaja con grandes series de datos, es preferible adquirir y guardar directamente los datos correspondientes a la señal de tensión. A continuación, con la ayuda de un software de cálculo, se convierten al valor de presión equivalente y se tratan para obtener los resultados requeridos.

5.2.1. Estructura del programa de adquisición de datos

El programa diseñado para la adquisición consiste en obtener y guardar los datos de tensión procedentes de los distintos transductores, para lo cual se emplea un canal por cada transductor. Con el fin de comprobar la evolución de las medidas, se monitorizan los datos que se están tomando. Al mismo tiempo, se hallan los valores de presión correspondientes a los datos de tensión tomados, empleando la función de transferencia del transductor en cada caso. Los valores de presión no se guardan, aunque se visualizan igualmente. Además, se muestra por pantalla la velocidad superficial del gas de entrada a la que se está midiendo, para lo cual se introduce el dato de caudal de aire fijado en el rotámetro. En la Figura 5.2 se indica mediante un organigrama el proceso de adquisición desarrollado.

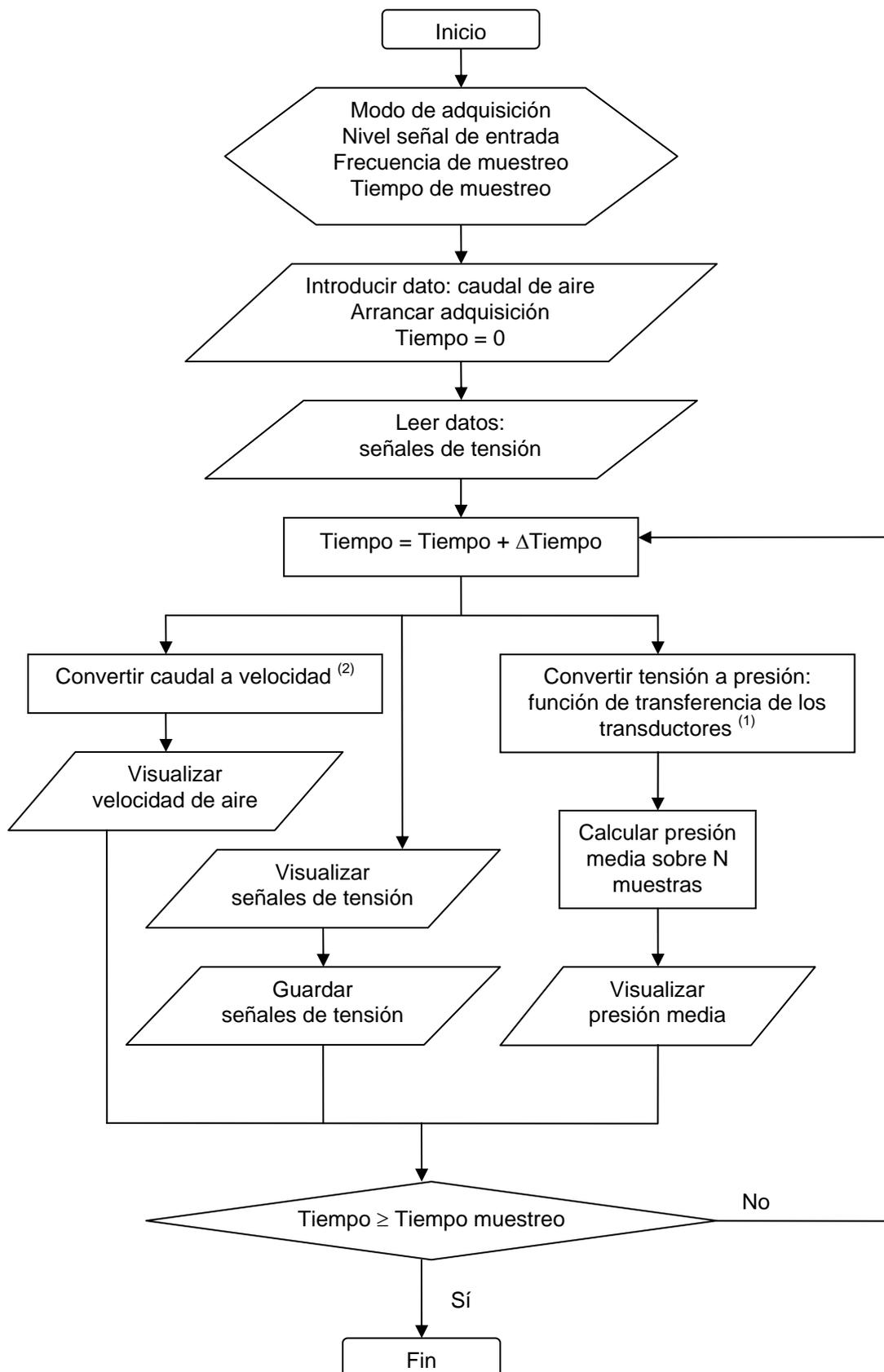


Figura 5.2. Organigrama del proceso de adquisición de datos.

Siendo las referencias del organigrama en la Figura 5.2:

(1) La función de transferencia de los transductores de presión es (Apartado 4.3.2):

$$\text{Transductores número 1, 2 y 3:} \quad \Delta p = 500 \cdot V - 25 \quad (4.2)$$

$$\text{Transductores número 4 y 5:} \quad \Delta p = 1500 \cdot V \quad (4.3)$$

(2) La velocidad del aire de entrada al lecho se halla como la relación entre el caudal y el área transversal de paso:

$$U = \frac{4Q}{6 \cdot 10^5 \pi D^2} \quad (5.1)$$

Donde el caudal Q se expresa en (l/min), el diámetro del lecho D en (m) y la velocidad superficial del aire U en (m/s).

5.2.2. Implementación del programa de adquisición de datos

Planteada la estructura del programa de adquisición, se desarrolla en DASYSLab el modelo correspondiente. Como se comentaba al comienzo del Apartado 5.2, la programación en DASYSLab se basa en la colocación de ciertos módulos sobre una hoja de trabajo, enlazados mediante conexiones que definen el flujo de datos. Por lo tanto, el programa de adquisición resulta sencillo y similar al de la Figura 5.2.

A continuación, se describe el modo en que se configura el programa para la medida, así como la función de los distintos módulos empleados. En la Figura 5.3 se muestra el icono con que se representan estos módulos.

- Configuración del hardware. Este menú, ubicado en la barra de funciones, permite configurar diferentes aspectos relativos a la TAD (modo de medida, nivel de la señal de entrada o nivel de la señal de salida). En este caso se elige el modo referenciado a tierra (single-ended) y un nivel de la señal de entrada de ± 5 V, por las razones vistas en el Apartado 4.4.3. El nivel de la señal de salida es una opción que no se modifica en este caso, por no utilizarse salidas desde la TAD.
- Configuración de la base de tiempos. Mediante este menú de la barra de funciones se selecciona el número de muestras por unidad de tiempo, es decir, la frecuencia de muestreo. En este caso, la frecuencia se fija en 200 Hz (visto en el Apartado 4.4.3).
- Entrada analógica. Este módulo hace referencia a la señal que se obtiene con la TAD. En él se selecciona el número de canales que se van a utilizar. En este caso se utilizan 5 canales de medida, uno por cada transductor de presión.
- Control de parada. Este módulo se emplea para fijar de forma automática la parada de la adquisición de datos, pasado un determinado tiempo de muestreo. En este caso, el tiempo de muestreo se fija en 300 segundos que, con la frecuencia de muestreo de 200 Hz, resulta en un tamaño de 60000 muestras por cada serie.

- Guardar datos. Se utiliza este módulo para configurar la grabación de los datos medidos (nombre del archivo, ubicación, formato o comentarios). Por razones de compatibilidad con el programa de cálculo empleado (Matlab), se elige el formato de representación ASCII, marcando la separación entre las distintas columnas con tabuladores y los decimales mediante puntos.
- Fórmula matemática. Mediante este módulo se puede aplicar una operación matemática sobre los datos de entrada. Existe la posibilidad de operar de forma independiente en los datos de entrada de los diferentes canales. En este caso, se utiliza para realizar la conversión de tensión a presión, a partir de la función de transferencia de los transductores en cada canal. También se emplea para realizar la conversión de caudal a velocidad superficial del aire de entrada.
- Media aritmética. Con este módulo se obtiene la media aritmética correspondiente a un número determinado de muestras en los datos de entrada. Se emplea para obtener un valor medio de la presión en un tiempo mayor que el definido por la frecuencia de muestreo.
- Selector. Este módulo permite introducir el valor de una variable de entrada concreta. Se emplea en este caso para ajustar el dato del caudal de aire de entrada.
- Display digital. Se emplea este módulo para mostrar por pantalla un dato o serie de datos que puedan ser de interés. En este caso, los valores que se visualizan son los de tensión y presión correspondientes a cada canal, junto con la velocidad superficial del gas de entrada.

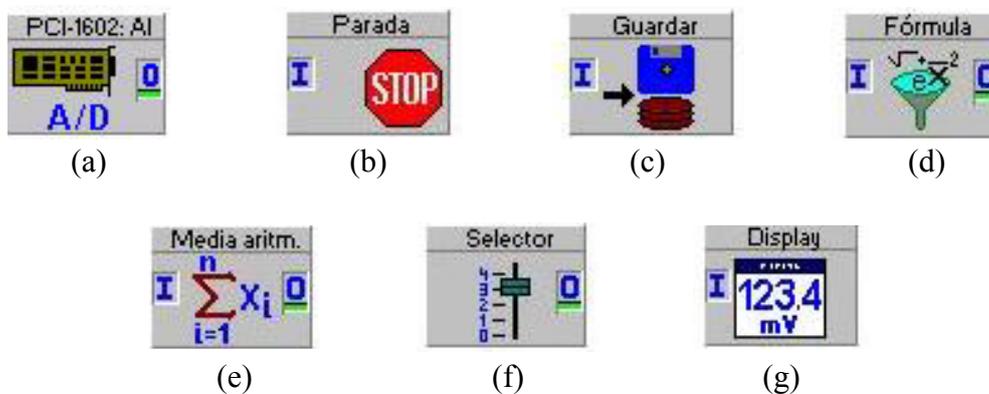


Figura 5.3. Icono de los diferentes módulos de DASyLab empleados en el programa de adquisición: (a) Entrada analógica; (b) Control de parada; (c) Guardar datos; (d) Fórmula matemática; (e) Media aritmética; (f) Selector; (g) Display digital.

Conocidas las distintas configuraciones y módulos utilizados, se define el programa de adquisición en DASyLab. En la Figura 5.4 se muestra el esquema del programa desarrollado sobre la hoja de trabajo. Las conexiones entre los módulos se hacen por cinco vías distintas, numeradas de 0 a 4, que se corresponden con el flujo de datos relativo a los cinco canales por los que se obtienen las señales de los cinco transductores de presión empleados.

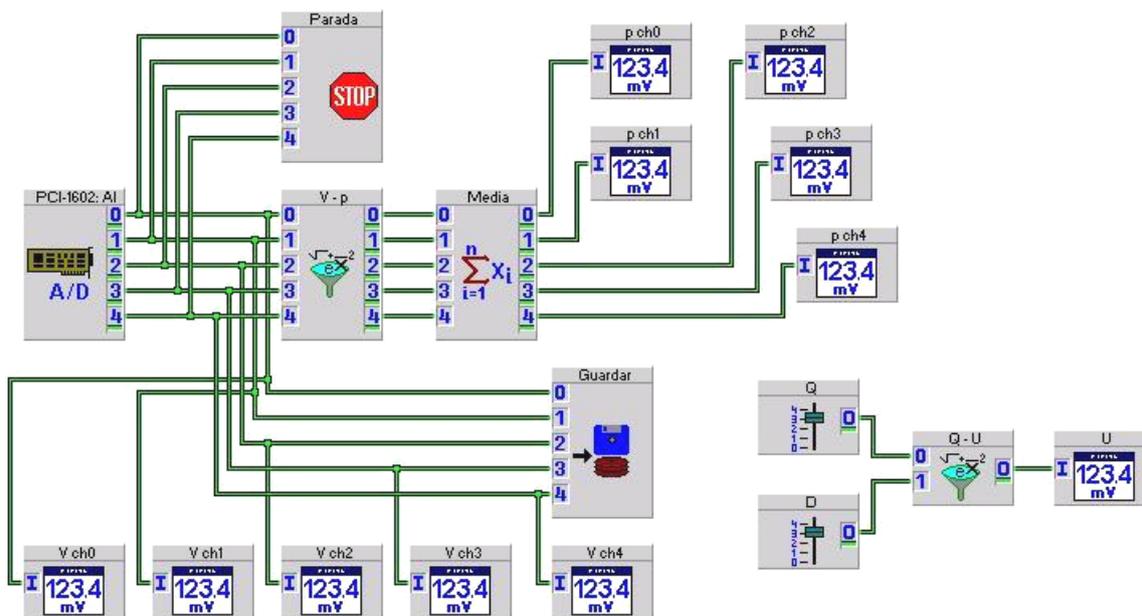


Figura 5.4. Esquema del programa de adquisición en DASyLab.

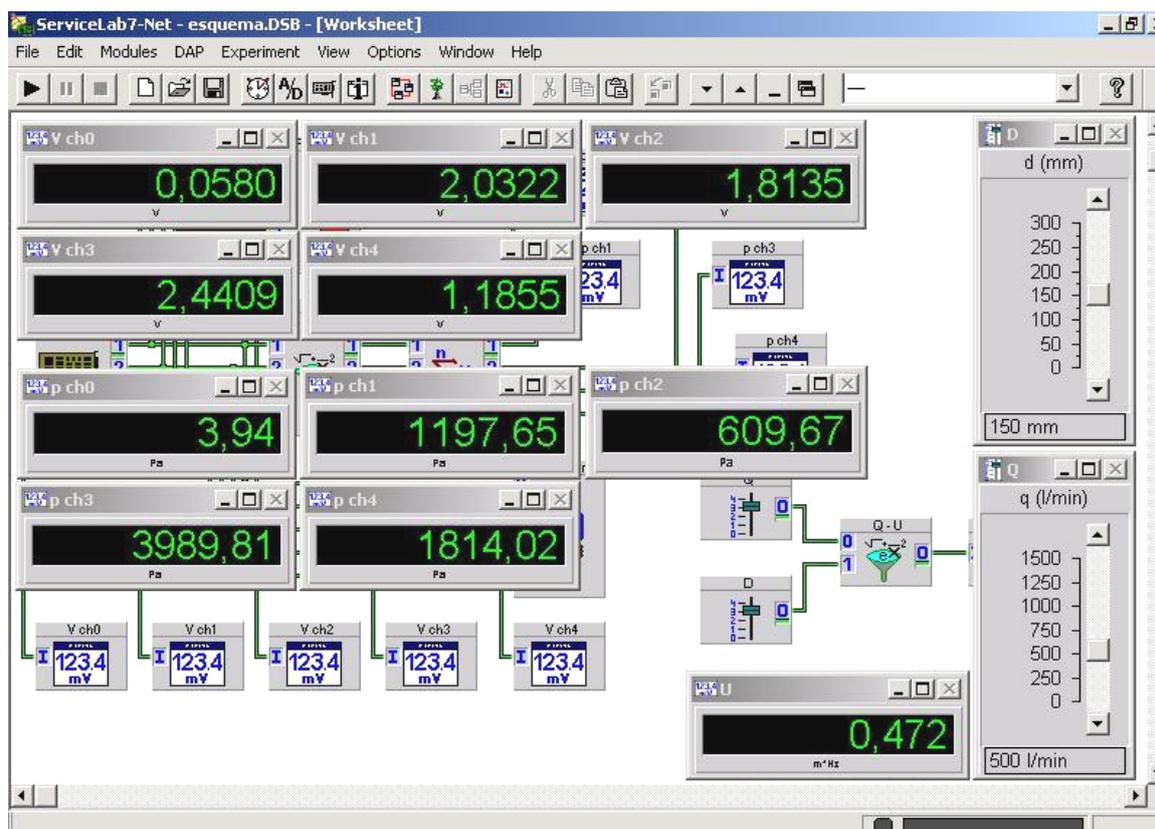


Figura 5.5. Pantalla visualizada durante el proceso de adquisición en DASyLab.

En la Figura 5.5 aparece la pantalla utilizada en el proceso de adquisición. Mediante esta pantalla es posible controlar ciertas operaciones, como arrancar el proceso o introducir el caudal de aire. Además, en ella se visualizan mediante diferentes displays los valores obtenidos de tensión instantánea, presión media y velocidad del aire. La pantalla de la figura muestra un intervalo de la medida de presión con el lecho de microesferas de vidrio, a una relación de altura del lecho fijo $L/D = 1.5$ y caudal 500 l/min. En los canales de 0 a 4, las medidas en los puntos z_6 , z_2 , z_3 , Plenum y z_1 respectivamente.

5.3. Aplicación de los métodos de cálculo experimentales

El hecho de manejar series con un elevado número de muestras hace que sea conveniente utilizar un programa de cálculo para el tratamiento de los datos. Por lo tanto, los valores de tensión adquiridos en DASyLab se guardan y posteriormente se tratan con un programa de cálculo, que en este caso es Matlab (versión 7.0).

El tratamiento de los datos obtenidos en el proceso de adquisición se enfoca al cálculo de la velocidad de mínima fluidización, relativa a las diferentes configuraciones de lecho ensayadas. Para ello se aplican los dos métodos experimentales enunciados en el Capítulo 3: método de pérdida de carga (Apartado 3.3) y método de las fluctuaciones de presión (Apartado 3.4).

El conjunto de operaciones asociadas a la aplicación de los dos métodos experimentales son las siguientes: leer los datos de tensión de cada transductor correspondientes a las distintas velocidades de aire, que se han obtenido con el programa de adquisición; pasar de tensión a presión, mediante la función de transferencia del transductor empleado en cada caso; hallar la presión media del total de muestras correspondientes a cada velocidad ensayada; calcular el incremento de presión medio en el lecho de partículas; hallar la desviación típica de las muestras de presión con respecto a la media hallada en cada caso; representar la evolución del incremento de presión medio en el lecho de partículas con respecto a la velocidad; representar la evolución de la desviación típica de las fluctuaciones de presión con respecto a la velocidad; determinar la velocidad de mínima fluidización en cada caso, mediante análisis de regresión lineal.

En la Figura 5.6 aparece un organigrama con las operaciones del tratamiento de datos, donde se hacen distintas referencias que se comentan a continuación. En el Anexo B.1 se muestra el código con el que se ejecutan dichas operaciones en Matlab, aplicado a una de las configuraciones ensayadas (Arena, $L/D = 1$).

(1) La función de transferencia de los diferentes transductores empleados es (Apartado 4.3.2):

$$\text{Transductores número 1, 2 y 3:} \quad \Delta p = 500 \cdot V - 25 \quad (4.2)$$

$$\text{Transductores número 4 y 5:} \quad \Delta p = 1500 \cdot V \quad (4.3)$$

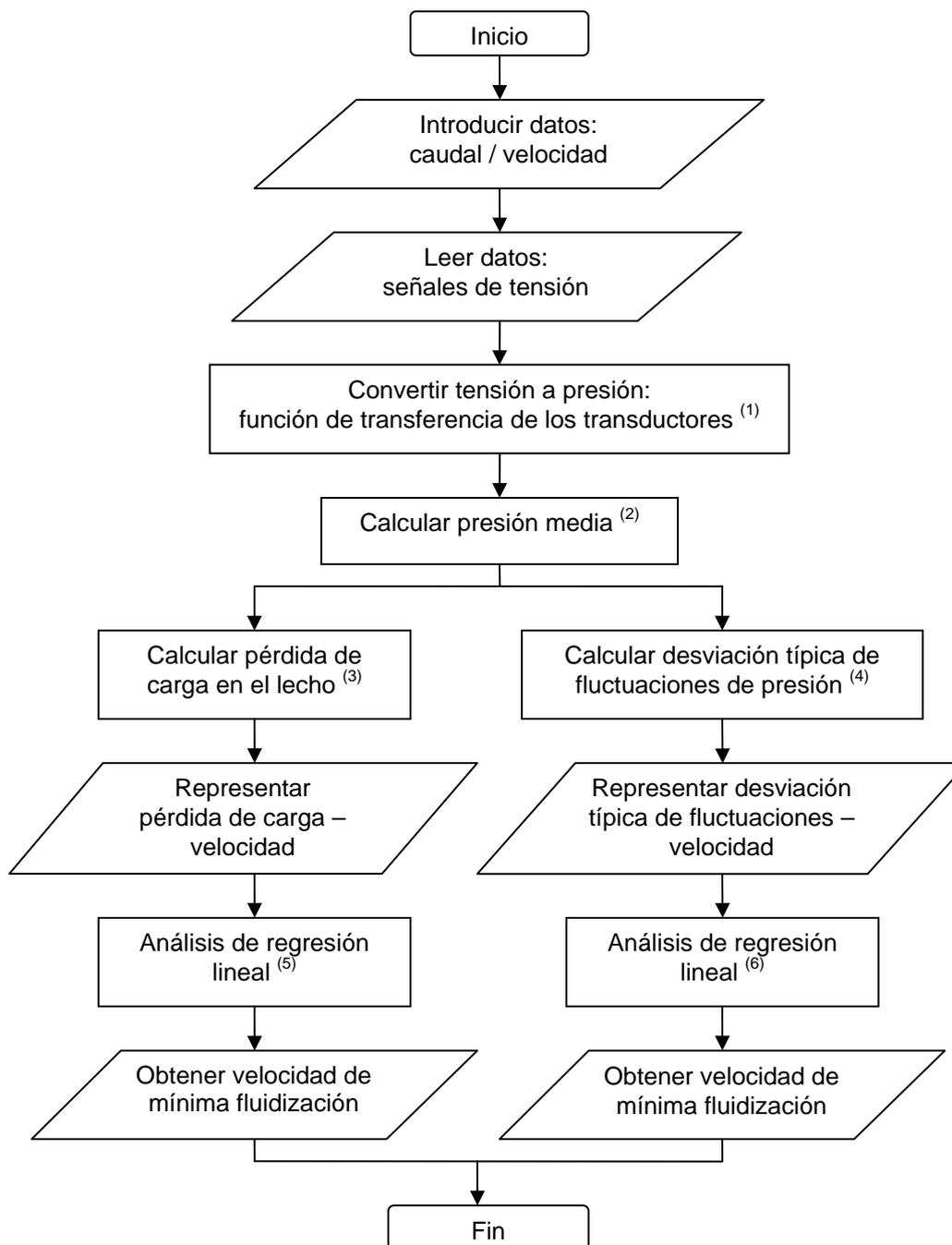


Figura 5.6. Organigrama del proceso de tratamiento de datos: aplicación de los métodos de cálculo experimentales de la velocidad de mínima fluidización.

- (2) Se calcula la presión media de las muestras medidas con cada transductor en las diferentes series de datos. Para ello, se aplica la Ecuación (5.2) donde p es una muestra con el valor instantáneo de presión dentro de una serie de N muestras.

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (5.2)$$

- (3) La pérdida de carga en el lecho se halla conocida la presión del aire aguas arriba y aguas abajo del mismo. En este caso, por el modo en que se ubican los sensores, se determina la pérdida de carga en el lecho como la presión media obtenida en el plenum (aguas arriba) menos la presión en el punto z_6 (aguas abajo) menos la pérdida de carga en el distribuidor.

$$\overline{\Delta p} = \overline{p}_{plenum} - \overline{\Delta p}_d - \overline{p}_{z_6} \quad (5.3)$$

- (4) Se calcula, para de cada serie de datos, la desviación típica de los valores de presión instantánea con respecto a la media hallada en (3). Se aplica la Ecuación (5.4).

$$\sigma_p = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (p_i - \overline{p})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

- (5) Se halla la velocidad de mínima fluidización mediante el análisis de regresión lineal de la recta de pérdida de carga frente a velocidad en la zona de lecho fijo (Apartado 3.3, Ecuación (3.11)).

$$\Delta p = a + bU \quad (3.11)$$

En la intersección de esta recta con la ordenada igual al peso del lecho de partículas entre la sección de éste se encuentra la velocidad de mínima fluidización.

$$U_{mf} = \frac{\frac{m_b g}{A} - a}{b} \quad (3.13)$$

- (6) Por otra parte, se calcula la velocidad de mínima fluidización mediante el análisis de regresión lineal en la recta de desviación típica de las fluctuaciones de presión frente a velocidad (Apartado 3.4, Ecuación (3.14)).

$$\sigma_p = a + bU \quad (3.14)$$

Se ha de tener en cuenta que las fluctuaciones de presión comienzan a ser de importancia para velocidades del gas superiores a la de mínimo burbujeo, que en este caso es igual a la de mínima fluidización. De este modo, se considera que para una velocidad del gas igual o menor que la de mínima fluidización la desviación típica de las fluctuaciones es cero. Entonces, la velocidad de mínima fluidización se halla como:

$$U_{mf} = -\frac{a}{b} \quad (3.15)$$

5.4. Aplicación del método de cálculo teórico

El método de cálculo teórico de la velocidad de mínima fluidización (Apartado 3.2) permite estimar el valor de este parámetro atendiendo a las propiedades de las partículas y el aire de entrada, además de la fracción de vacío del lecho. El resultado de este método se emplea para valorar el acierto en el cálculo conseguido con los métodos experimentales.

En la Figura 5.7 se indica el esquema de cálculo de este método. En el Anexo B.2 se muestra el código de aplicación de este método con Matlab, particularizado para la configuración de arena con $L/D = 1$.

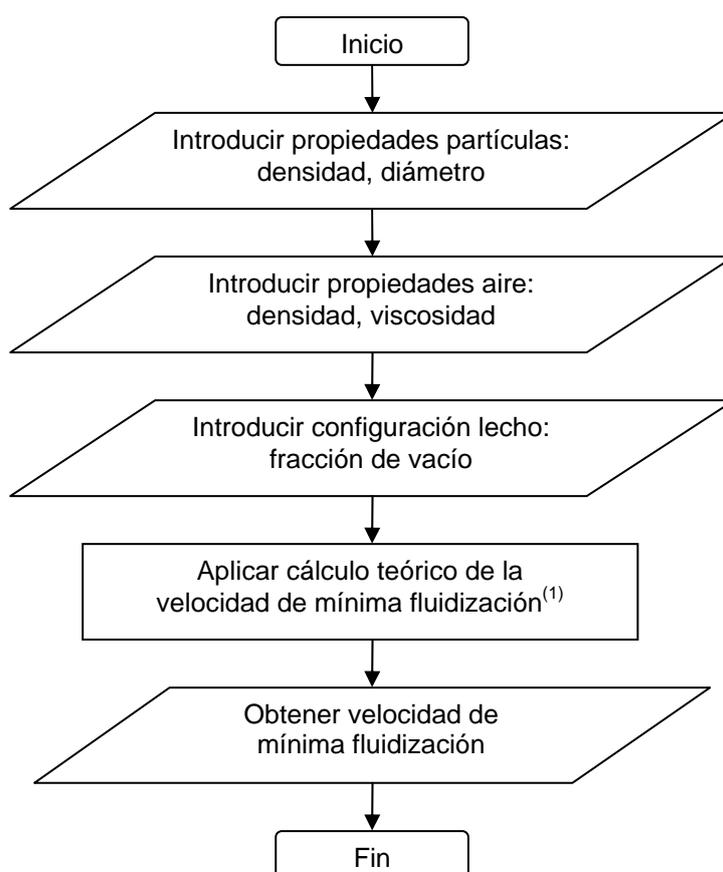


Figura 5.7. Organigrama del método de cálculo teórico de la velocidad de mínima fluidización.

Siendo la referencia en el organigrama de la Figura 5.7:

(1) La velocidad de mínima fluidización se obtiene mediante la Ecuación (3.5) del método de cálculo teórico.

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g U_{mf}}{d_p^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g U_{mf}^2}{d_p} \quad (3.5)$$

La ecuación establece la relación entre la velocidad de mínima fluidización y las propiedades de las partículas (densidad y diámetro), el aire de entrada (densidad y viscosidad) y la configuración del lecho (fracción de vacío).

Referencias bibliográficas Capítulo 5

[4] [5] Apartado 5.1

[25] Apartado 5.2

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6. RESULTADOS

Este capítulo recoge los resultados obtenidos del conjunto de medidas y cálculos, llevados a cabo según los criterios definidos en el Capítulo 5. Se comienza por evaluar el tamaño de muestra elegido para el ensayo y calcular la pérdida de carga en el distribuidor del lecho. Se habla también de la aparición de fenómeno de slugging en algunos momentos puntuales del ensayo y cómo esto se ve reflejado en los resultados. A continuación, se obtiene la velocidad de mínima fluidización correspondiente a las diferentes configuraciones ensayadas, mediante la aplicación de los distintos métodos de cálculo descritos. Finalmente, se establece una comparativa entre las distintas configuraciones, de acuerdo con tres aspectos estudiados que pueden tener influencia sobre la velocidad de mínima fluidización: la colocación del sensor, las propiedades de las partículas y la altura de llenado del lecho. En la Tabla 6.1 se resumen las condiciones experimentales ensayadas: tipos de partículas y propiedades, altura de llenado, masa del lecho y velocidad del aire de entrada.

$D = 0.150 \text{ m}$						
Tipo de partícula	$d_p (\mu\text{m})$	$\rho_p (\text{g/cm}^3)$	$L (\text{m})$	$L/D (\text{)}$	$m_b (\text{kg})$	$U (\text{m/s})$
Arena	700	2.651	0.150	1	4.2	0.950 – 0
			0.225	1.5	6.3	
Microesferas de vidrio	600	2.489	0.150	1	4.1	0.650 – 0
			0.225	1.5	6.15	

Tabla 6.1. Condiciones experimentales ensayadas.

6.1. Tamaño de la muestra

En el trabajo de Wilkinson [5] se estudia el tamaño de muestra mínimo para obtener resultados fiables de la velocidad de mínima fluidización, mediante el método de desviación típica de las fluctuaciones de presión. Los experimentos han demostrado que para tamaños mayores de 10000 muestras se obtiene una gran consistencia en el valor de la desviación típica.

De forma similar, se estudia en este caso el efecto del número de muestras tomadas sobre el valor de la desviación típica de las fluctuaciones, particularizando para el lecho de arena con altura $L = 0.225 \text{ m}$ ($L/D = 1.5$), a una velocidad del aire $U = 0.470 \text{ m/s}$ y medida en el punto $z_2 = 0.152 \text{ m}$ (Figura 6.1). A la vista de los resultados, se comprueba que para un número de muestras inferior a 10000 la desviación típica varía de forma considerable con respecto al valor obtenido para el mayor tamaño de muestra (60000 muestras) supuesto consistente. Desde 10000 muestras en adelante la desviación típica se mantiene en un valor próximo al consistente, con resultados del error relativo inferiores al 4 %; a partir de 40000 muestras el error es inferior al 1 %. De este modo, con un tamaño de 60000 muestras se consigue un valor de la desviación típica de las fluctuaciones adecuado para el cálculo de la velocidad de mínima fluidización.

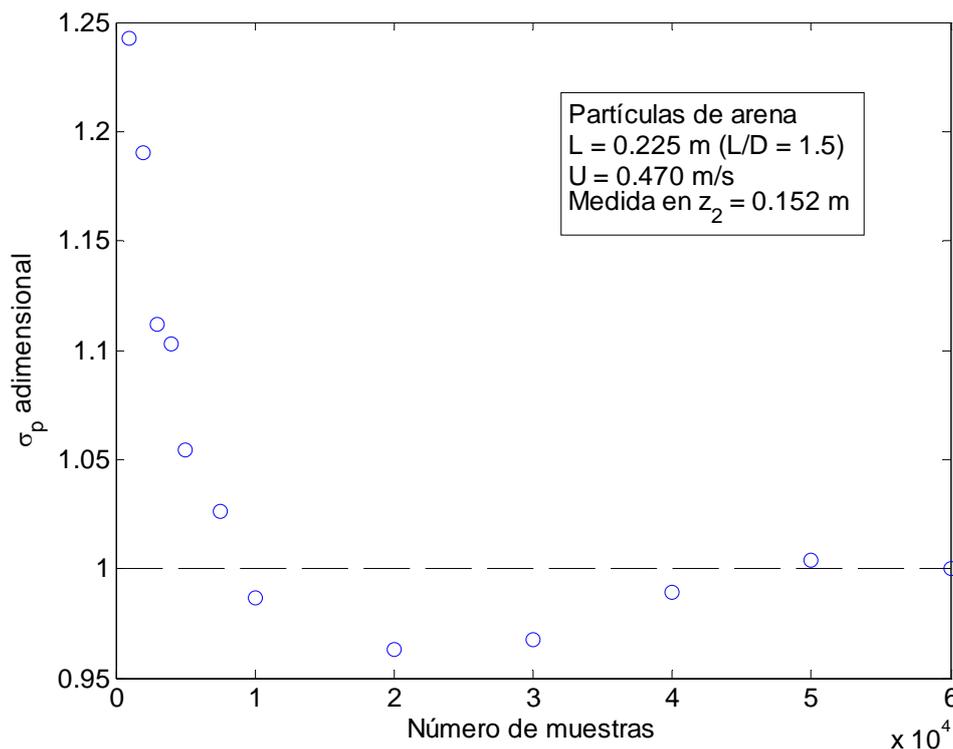


Figura 6.1. Desviación típica de las fluctuaciones de presión frente al tamaño de muestra. Partículas de arena, $L/D = 1.5$, $U = 0.470$ m/s, medida en $z_2 = 0.152$ m. Siendo σ_p adimensional el cociente entre la desviación típica de las fluctuaciones en una muestra de tamaño N y la desviación típica de las fluctuaciones en las 60000 muestras.

6.2. Pérdida de carga en el distribuidor

En el Apartado 4.1 se comenta que el aire sufre una pérdida de carga a su paso por el lecho, aparte de la debida a la fluidización de las partículas. Por su diseño, la pérdida más importante se localiza en el distribuidor, donde tiene lugar una reducción considerable del área de paso. En general, es preciso valorar esta pérdida de carga y compararla con respecto a la pérdida de fluidización del lecho. Además, en este caso, la pérdida de carga en el distribuidor se emplea en el cálculo de la pérdida en el lecho, como se definía en el Apartado 5.3.

Diversos estudios, contrastados por Kunii y Levenspiel [1], demuestran que se debe producir una pérdida de carga en el distribuidor suficientemente grande para conseguir una fluidización uniforme. Una pérdida elevada asegura una mayor distribución del gas de entrada pero, si es excesiva, puede implicar un mayor coste de adquisición del aparato de impulsión, así como de la energía consumida en el proceso. Por ello, es importante conocer la mínima pérdida de carga requerida para asegurar una fluidización uniforme en el rango de operación.

Son varias las recomendaciones propuestas sobre la pérdida de carga más apropiada en el distribuidor, de cara a conseguir una operación estable. En la Ecuación (6.1) se indica una de ellas, propuesta por Hiby [14].

$$\Delta p_d = 0.15\Delta p \text{ para } U = (1 - 2)U_{mf} \quad (6.1)$$

Donde Δp_d es la pérdida de carga en el distribuidor y Δp la pérdida de carga a través del lecho de partículas.

En la Figura 6.2 se muestra la pérdida de carga medida en el distribuidor del lecho, en un rango de velocidades del aire de entrada de 0 – 1 m/s. Se halla su valor como la diferencia entre la presión en el plenum y la presión en el punto $z_0 = 0.062$ m, con el lecho en vacío. Se observa que la pérdida de carga en el distribuidor varía con respecto a la velocidad del aire de entrada de forma cuadrática, como se había demostrado en otros estudios para distribuidores de plato perforado [1].

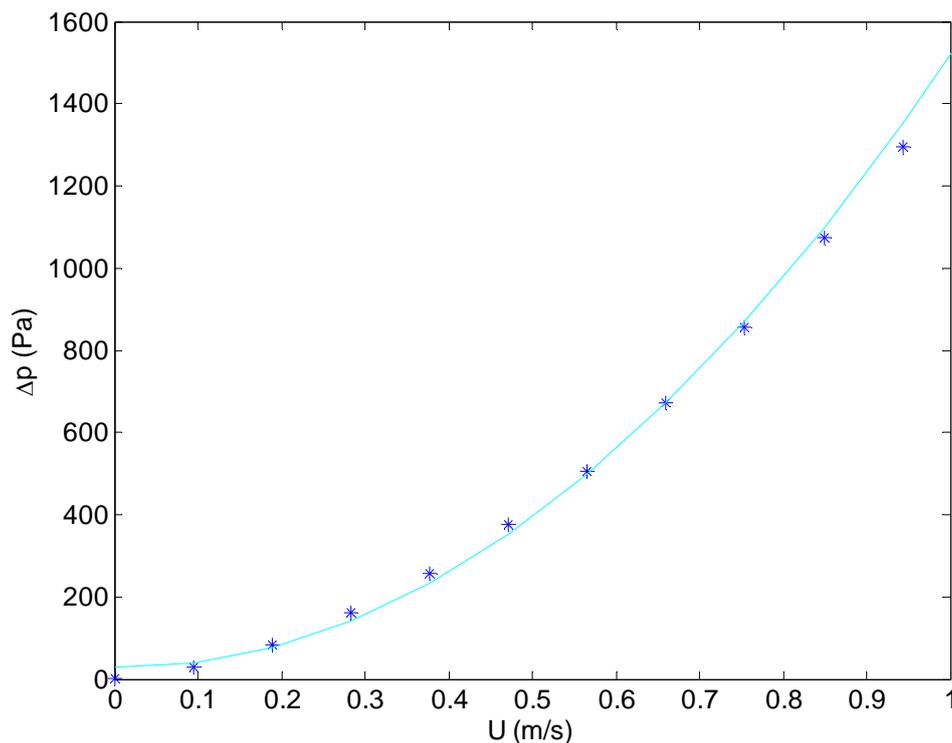


Figura 6.2. Evolución de la pérdida de carga en el distribuidor Δp_d con respecto a la velocidad del aire de entrada U .

De cara a comprobar si el distribuidor del lecho se ajusta a la correlación de la Ecuación (6.1), se representa la curva de pérdida de carga en el distribuidor entre pérdida de carga en el lecho $\Delta p_d/\Delta p$ frente al exceso de aire de fluidización U/U_{mf} , correspondiente al lecho de arena, en alturas de llenado de $L/D = 1$ y $L/D = 1.5$ (Figura 6.3). De forma aproximada, se obtiene que la relación $\Delta p_d/\Delta p = 0.15$ se alcanza para $U/U_{mf} = 1.1$ en $L/D = 1$ y para $U/U_{mf} = 1.4$ en $L/D = 1.5$. En el lecho de microesferas de vidrio la relación es similar pues la pérdida de carga es semejante en las dos alturas. Por lo tanto, se puede concretar que la fluidización es estable en las cuatro correlaciones ensayadas, según la recomendación en la Ecuación (6.1).

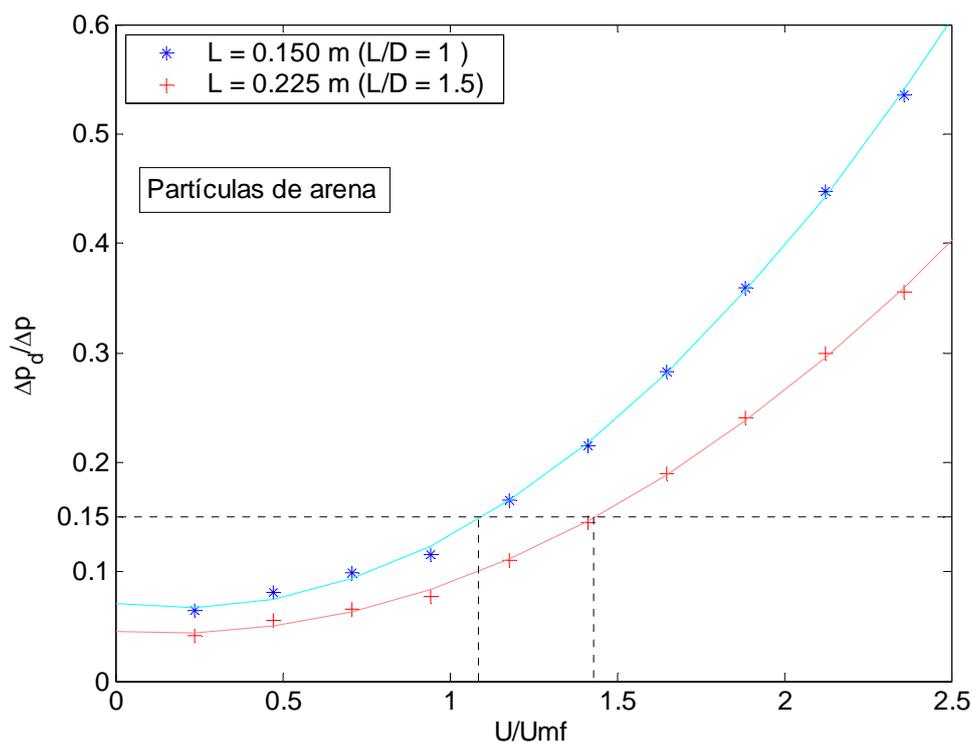


Figura 6.3. Relación de pérdida en el distribuidor entre pérdida en el lecho $\Delta p_d / \Delta p$ frente al exceso de aire U/U_{mf} . Lecho de arena, $L/D = 1$ y $L/D = 1.5$

6.3. Aparición de slugging

Como se comenta en el apartado 5.1, el ensayo de fluidización se lleva a cabo desde una velocidad del aire de entrada de 2.5 veces la velocidad de mínima fluidización, aproximadamente. Durante la operación, se observó la aparición de burbujas de tamaño elevado (con diámetro cercano al de la columna del lecho) para velocidades del aire de entre 2 y 2.5 veces la de mínima fluidización. La formación de estas burbujas de gran tamaño era de carácter aleatorio en el tiempo y tenía lugar en la mitad superior del lecho de partículas. A la vista del comportamiento, se apunta a la aparición de fenómeno de slugging en ese rango de velocidades; en el Apartado 2.1 se comentan algunas características de este fenómeno.

La idea de la aparición de slugging se consolida con la representación de la pérdida de carga en el lecho frente a la velocidad del aire (Figura 6.4). Se observa en esta gráfica un ligero aumento en la pérdida de carga del lecho fluidizado con la velocidad del aire, en lugar de permanecer constante, para velocidades de entre 2 y 2.5 veces la de mínima fluidización. Este aumento en la pérdida de carga ya lo habían observado Chen et al. [13] en su trabajo sobre lechos fluidizados con fenómeno de slugging.

En la Figura 6.4 se muestra ese aumento en la pérdida de carga con la velocidad del aire de entrada debido a la aparición de slugging, para el lecho de arena y $L/D = 1$. El comportamiento se observa con más claridad en las partículas de arena que en las microesferas de vidrio; en el Anexo C se muestra la gráfica correspondiente a los diferentes casos ensayados. Hay que recordar que el slugging aparece con más frecuencia cuanto mayor es el tamaño de las partículas, de ahí que sea más acusado en el caso de la arena.

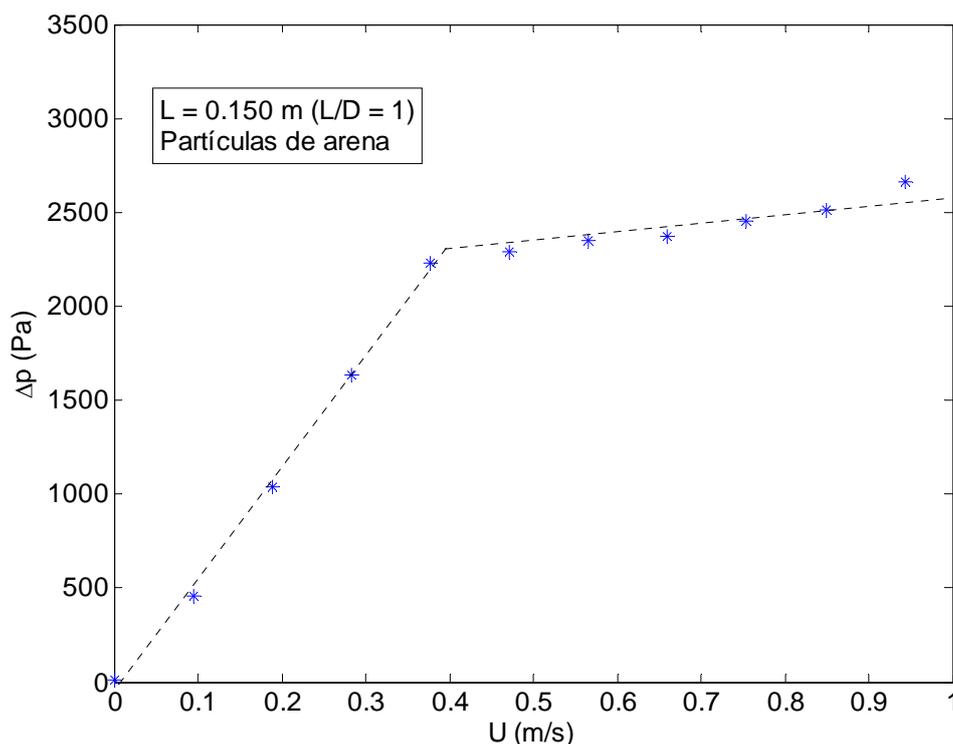


Figura 6.4. Pérdida de carga en el lecho Δp frente a velocidad del aire de entrada U . Arena, $L/D = 1$.

El incremento en la pérdida de carga del lecho durante la fluidización debido a la aparición de slugging es como máximo del 10 %, para el punto de mayor velocidad ensayado. A pesar de ese ligero aumento en la pérdida de carga, el cálculo de la velocidad de mínima fluidización se hace con la intersección entre la recta de pérdida de carga en el lecho fijo y la ordenada correspondiente a la relación $m_b g/A$, según el método indicado en el Apartado 3.3.

6.4. Velocidad de mínima fluidización

En este apartado se muestran los resultados de la velocidad de mínima fluidización obtenidos para las distintas configuraciones de lecho ensayadas, según los métodos de cálculo vistos en el Capítulo 3: métodos de cálculo experimentales (Apartados 3.3 y 3.4) y método de cálculo teórico (Apartado 3.2). En la Tabla 6.2 se resumen los resultados correspondientes a las cuatro configuraciones ensayadas. En el Anexo C se describen con más detalle estos resultados.

De forma general, se han obtenido valores de la velocidad de mínima fluidización similares entre el método teórico (Ecuación (3.5)) y los dos métodos experimentales empleados. El método de la pérdida de carga ofrece peores resultados, con un error relativo máximo y medio (con respecto al teórico) del 15 % y 8 % respectivamente. A partir del método de la desviación típica de las fluctuaciones de presión, el error relativo máximo y medio (con respecto al teórico) es del 9 % y 4 % respectivamente. Con el método de la desviación típica de las fluctuaciones la exactitud conseguida es bastante buena. La menor precisión del método de la pérdida de carga está relacionada con la

dificultad para definir la transición entre el lecho fijo y el lecho fluidizado, a partir de la cual se determina la velocidad de mínima fluidización.

Hallada la velocidad de mínima fluidización en cada caso, se comprueba la dependencia entre el valor obtenido y tres aspectos que se han variado en el estudio: el punto de medida, las propiedades de las partículas y la altura de llenado del lecho. La comprobación de los aspectos mencionados se hace comparando algunas de las configuraciones, no todas ellas. Para ello, se representan diferentes gráficas ilustrativas, siendo útil seguir los razonamientos con los resultados resumidos en la Tabla 6.2.

		Método teórico	Métodos experimentales					
			$\Delta p - U$	$\sigma_p - U$				
				z_0	z_1	z_2	z_3	Plenum
Arena $L/D = 1$	U_{mf} (m/s)	0.381	0.399	0.356	0.378	–	–	0.362
	Err (%)	–	4.7	7.0	0.8	–	–	5.2
Arena $L/D = 1.5$	U_{mf} (m/s)	0.381	0.403	–	0.419	0.375	0.392	0.403
	Err (%)	–	5.5	–	9.1	1.6	2.8	5.5
Microesferas de vidrio $L/D = 1$	U_{mf} (m/s)	0.241	0.259	0.247	0.236	–	–	0.254
	Err (%)	–	6.9	2.4	2.1	–	–	5.1
Microesferas de vidrio $L/D = 1.5$	U_{mf} (m/s)	0.241	0.286	–	0.250	0.253	0.256	0.237
	Err (%)	–	15.7	–	3.6	4.7	5.9	1.7

Tabla 6.2. Velocidad de mínima fluidización hallada según el método teórico y los métodos experimentales de $\Delta p - U$ y $\sigma_p - U$.

6.4.1. Influencia de la posición del sensor sobre la velocidad de mínima fluidización

Se pretende observar cómo varía la velocidad de mínima fluidización hallada experimentalmente con la posición axial del sensor de presión. De este modo, se comparan los resultados obtenidos en los diferentes sensores, para un mismo tipo de partículas (arena) y una altura de llenado del lecho constante ($L/D = 1.5$). Ver Figuras 6.5 a 6.7.

En la Figura 6.5 se muestra la pérdida de carga frente a la velocidad del aire, para los distintos puntos de medida del lecho. Como se comenta en el Apartado 5.3, se obtiene la pérdida de carga en el lecho con la presión en el plenum menos la presión en el punto z_6 menos la pérdida en el distribuidor. En el resto de puntos situados en la columna se halla la pérdida de carga con la presión medida en el propio punto menos la presión en z_6 . En la gráfica se observa que en todos los puntos la pérdida se aproxima a la relación

$m_b g/A$ (se representa la ordenada correspondiente en línea discontinua) donde m_b es la masa correspondiente a la fracción del lecho de partículas que se encuentra sobre cada punto. Además, es posible aproximar la velocidad de mínima fluidización en cada caso, según los criterios del método de pérdida de carga.

En la Figura 6.6 se muestra el resultado de la velocidad de mínima fluidización obtenido a partir de la desviación típica de las fluctuaciones de presión. Los valores son similares en los diferentes puntos, y más próximos al valor teórico de la Ecuación (3.5) que los obtenidos a partir de la pérdida de carga (Figura 6.5). Además, se observa que es posible determinar correctamente la velocidad de mínima fluidización midiendo en el plenum. Esto supone una gran ventaja, pues se evitan los problemas relacionados con la presencia de partículas en el sensor (obstrucción o erosión) y la exposición a altas temperaturas, en el caso de reactores calientes.

En la Figura 6.7 se muestra la evolución de la desviación típica de las fluctuaciones con el exceso de aire de entrada en el lecho. Se entiende por exceso, la cantidad de aire de entrada mayor a la necesaria para fluidizar el lecho. La experiencia ha demostrado que una cantidad de aire superior a la precisa para la fluidización pasa a través del lecho en forma de burbujas, manteniéndose las partículas en estado fluidizado (Apartado 2.6). A la vista de la gráfica, en todos los sensores se registra un nivel de fluctuaciones similar con respecto al exceso de aire. Esto indica que todos ellos recogen de igual manera la información relacionada con la aparición y ascenso de burbujas por el lecho.

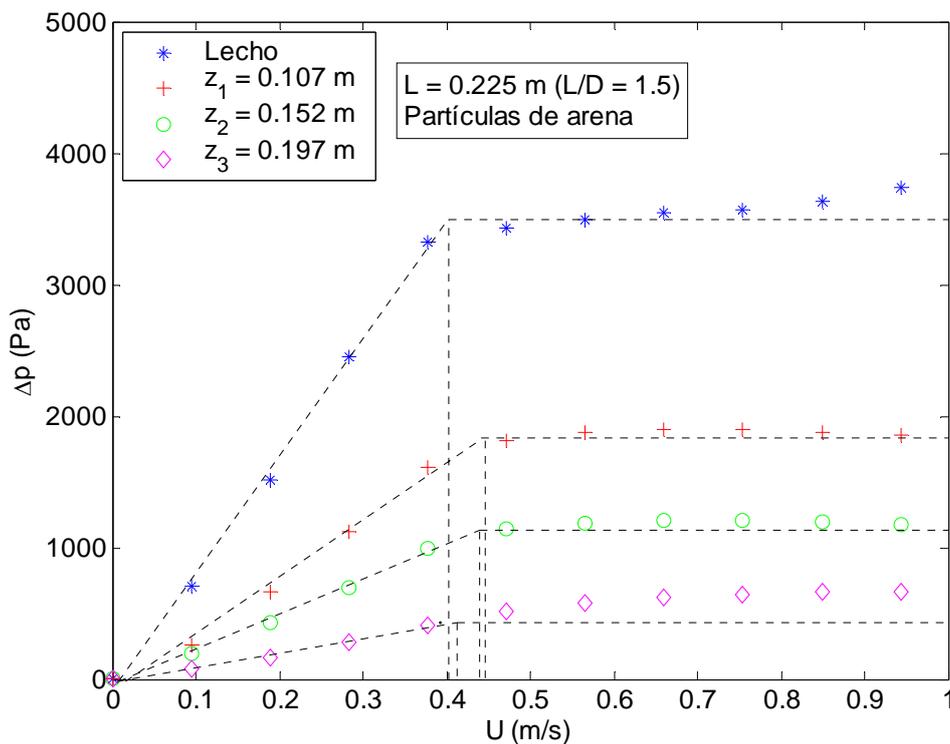


Figura 6.5. Pérdida de carga en el lecho Δp frente a la velocidad del aire U . Partículas de arena, $L/D = 1.5$.

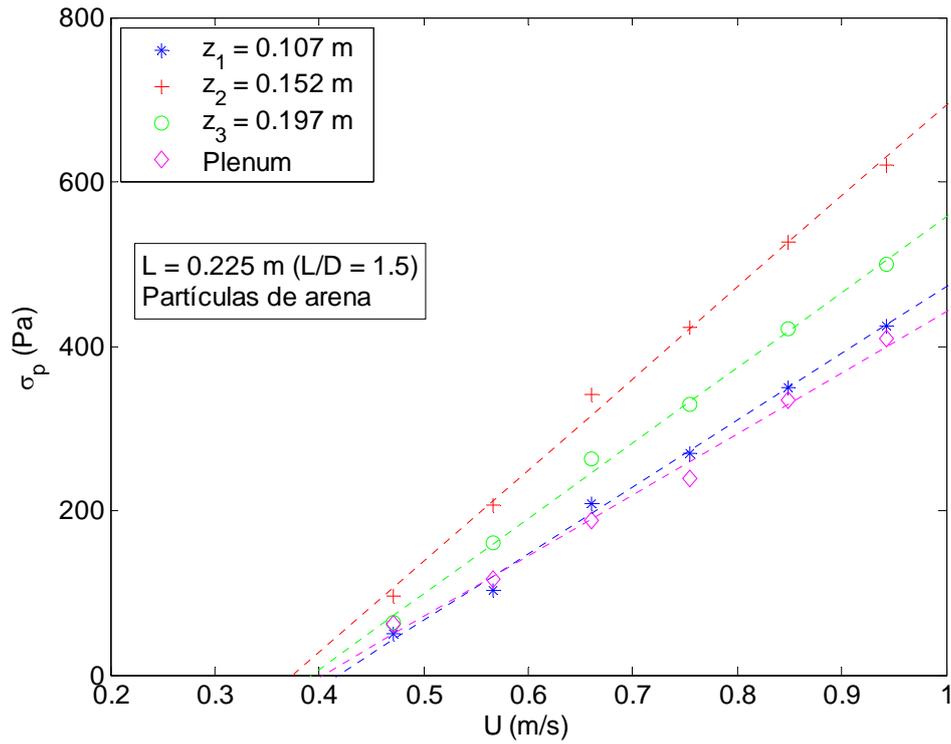


Figura 6.6. Desviación típica de las fluctuaciones σ_p frente a la velocidad del aire U . Partículas de arena, $L/D = 1.5$.

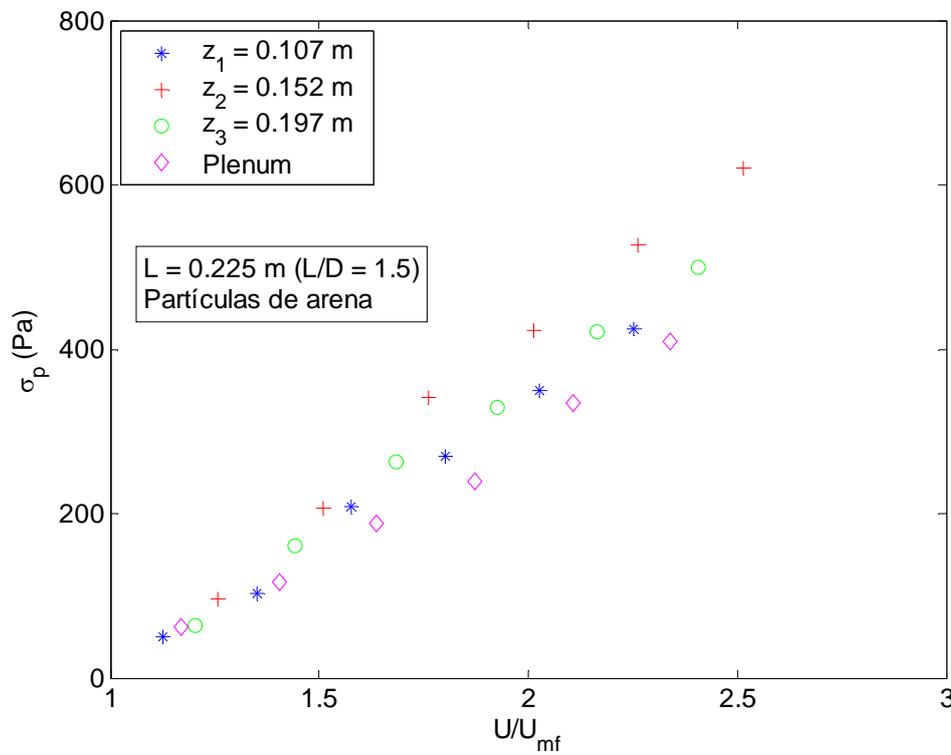


Figura 6.7. Desviación típica de las fluctuaciones σ_p frente al exceso de aire U/U_{mf} . Partículas de arena, $L/D = 1.5$.

6.4.2. Influencia de las propiedades de las partículas sobre la velocidad de mínima fluidización

Por otra parte, se estudia la influencia de las propiedades de las partículas sobre la velocidad de mínima fluidización. Para ello, se comparan los resultados obtenidos en las partículas de arena y las microesferas de vidrio, a una misma altura de llenado del lecho ($L/D = 1$) y en un punto de medida común a ambas configuraciones (plenum). Ver Figuras 6.8 a 6.10.

En la Tabla 4.1 se resumen las propiedades de las partículas, visto en el Apartado 4.2. A partir del método de cálculo teórico se obtiene mayor velocidad de mínima fluidización en las partículas de arena (0.381 m/s) que en las microesferas de vidrio (0.241 m/s). Las partículas de arena tienen mayor diámetro y densidad de partícula, además de una forma menos esférica, presentando así una fracción de vacío del lecho fijo mayor. Según la Ecuación (3.5), la velocidad de mínima fluidización aumenta con el diámetro y la densidad de partícula, así como con la fracción de vacío del lecho. De ahí el mayor valor obtenido en el lecho de arena.

Partícula \ Propiedad	d_p (μm)	ρ_p (g/cm^3)	ρ_b (g/cm^3)	ε
Arena de sílice	700	2.651	1.585	0.402
Microesferas de vidrio	600	2.489	1.547	0.378

Tabla 4.1. Propiedades de las partículas ensayadas.

La Figura 6.8 se refiere a la pérdida de carga en el lecho. La pérdida de carga en el lecho fijo es similar en ambos casos; se recuerda que la masa del lecho de partículas es de $m_b = 4.2$ kg en la arena y $m_b = 4.1$ kg en las microesferas de vidrio, para la altura de llenado de $L/D = 1$. A pesar de ello, la velocidad de mínima fluidización es menor en las microesferas de vidrio (0.259 m/s) que en la arena (0.399 m/s), con valores próximos a los obtenidos en el método teórico.

A partir de la desviación típica de las fluctuaciones medidas en el plenum (Figura 6.9), se observa igualmente una velocidad de mínima fluidización mayor en las partículas de arena (0.362 m/s) que en las microesferas de vidrio (0.254 m/s). Al representar la desviación típica de las fluctuaciones frente al exceso de aire (Figura 6.10) se aprecia una tendencia muy similar para los dos tipos de partículas. Según este análisis, con el mismo exceso de aire, la formación y ascenso de burbujas es semejante en ambos lechos para los dos tipos de partículas ensayadas, a igual altura de llenado del lecho fijo.

Por lo tanto, se comprueba que la velocidad de mínima fluidización crece con el diámetro y la densidad de las partículas. Además, con la información que este método aporta, se puede afirmar que la aparición y ascenso de burbujas en el lecho no depende de las propiedades de las partículas. Sería interesante comprobar el comportamiento en un mayor rango de tamaños y densidades de partícula.

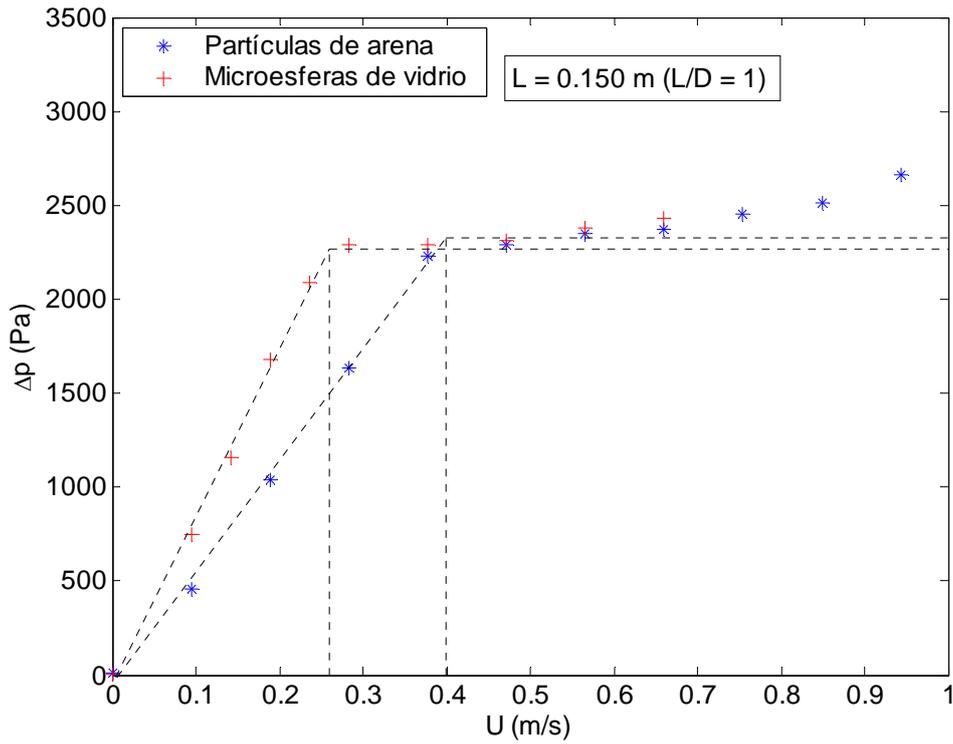


Figura 6.8. Pérdida de carga en el lecho Δp frente a la velocidad del aire U . Partículas de arena y microesferas de vidrio, $L/D = 1$.

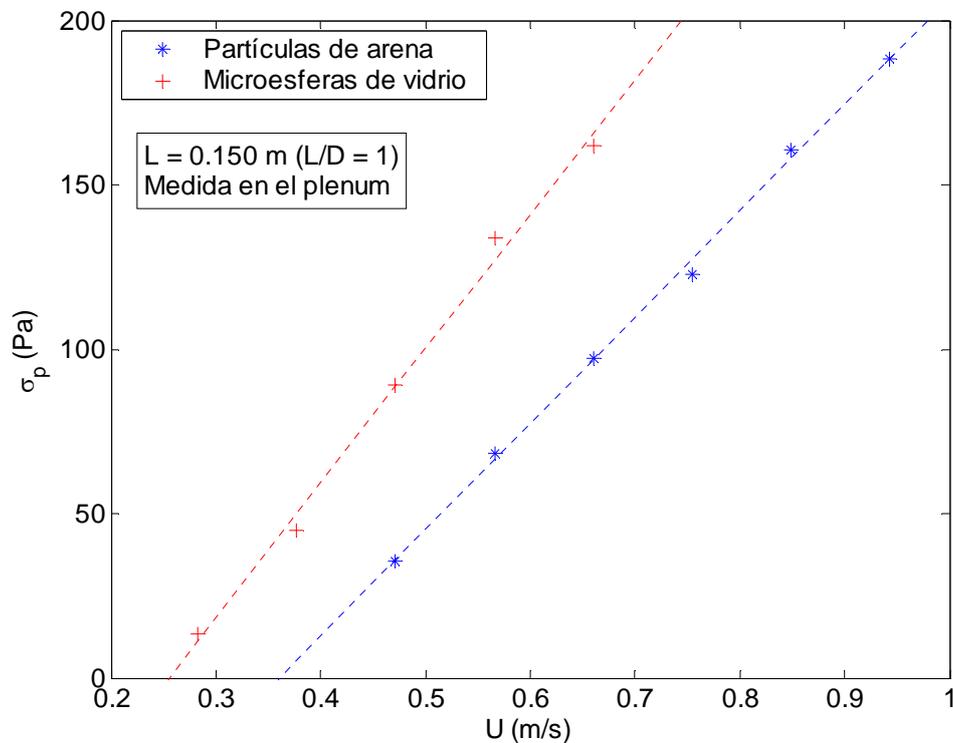


Figura 6.9. Desviación típica de las fluctuaciones σ_p frente a la velocidad del aire U . Partículas de arena y microesferas de vidrio, $L/D = 1$.

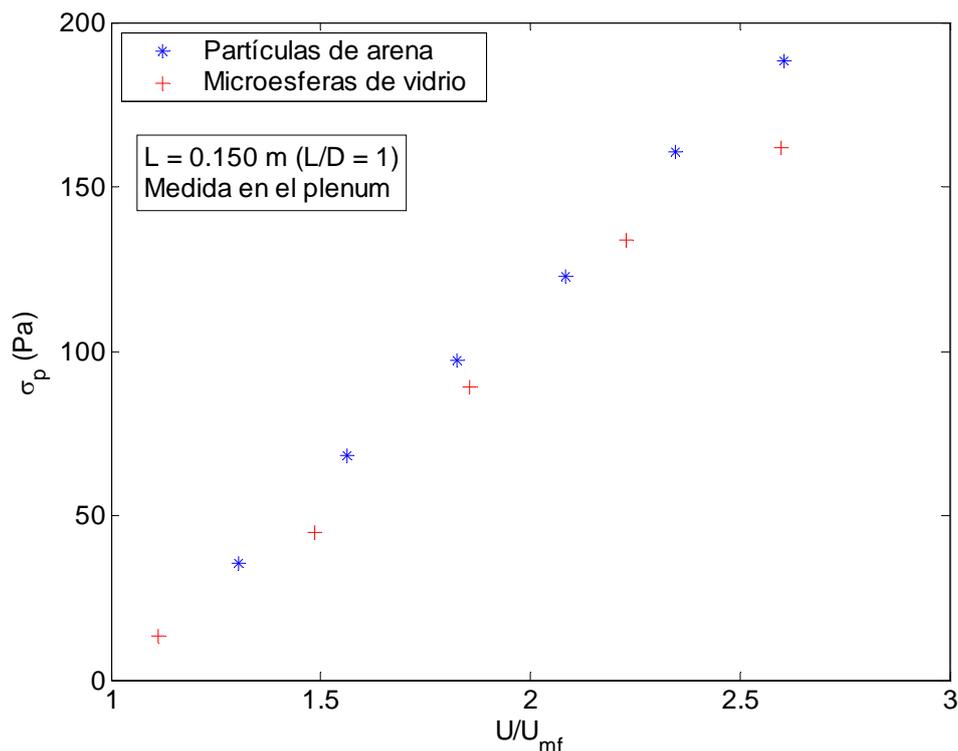


Figura 6.10. Desviación típica de las fluctuaciones σ_p frente al exceso de aire U/U_{mf} . Partículas de arena y microesferas de vidrio, $L/D = 1$.

6.4.3. Influencia de la altura de lecho fijo sobre la velocidad de mínima fluidización

Se analiza también si la altura de llenado del lecho fijo influye sobre la velocidad de mínima fluidización. Así, se comparan los datos obtenidos para las dos alturas del lecho ensayadas ($L/D = 1$ y $L/D = 1.5$) con un mismo tipo de partículas (arena) y con medida en un punto común ($z_l = 0.107$ m).

Atendiendo a los resultados obtenidos con el método teórico (Ecuación (3.5)), la velocidad de mínima fluidización no depende de la altura de llenado del lecho, para un mismo tipo de partículas ensayadas. Como se ha visto, los parámetros que influyen son las propiedades de las partículas (densidad y diámetro) y la fracción de vacío del lecho fijo. Estos parámetros no varían con la altura de llenado, de ahí que la velocidad de mínima fluidización (0.381 m/s en la arena) permanezca constante según la correlación propuesta en el método teórico.

La pérdida de carga en el lecho de $L/D = 1$ es menor que en el de $L/D = 1.5$, lo que es normal debido al mayor peso de este último (Figura 6.11). No obstante, la velocidad de mínima fluidización es similar en el lecho de $L/D = 1$ (0.399 m/s) y en el de $L/D = 1.5$ (0.403 m/s), tal y como sucede en el caso teórico. A partir de la desviación típica de las fluctuaciones medidas en el plenum (Figura 6.12) se observa una velocidad de mínima fluidización semejante en los dos casos, aunque levemente menor en $L/D = 1$ (0.362 m/s) que en $L/D = 1.5$ (0.403 m/s).

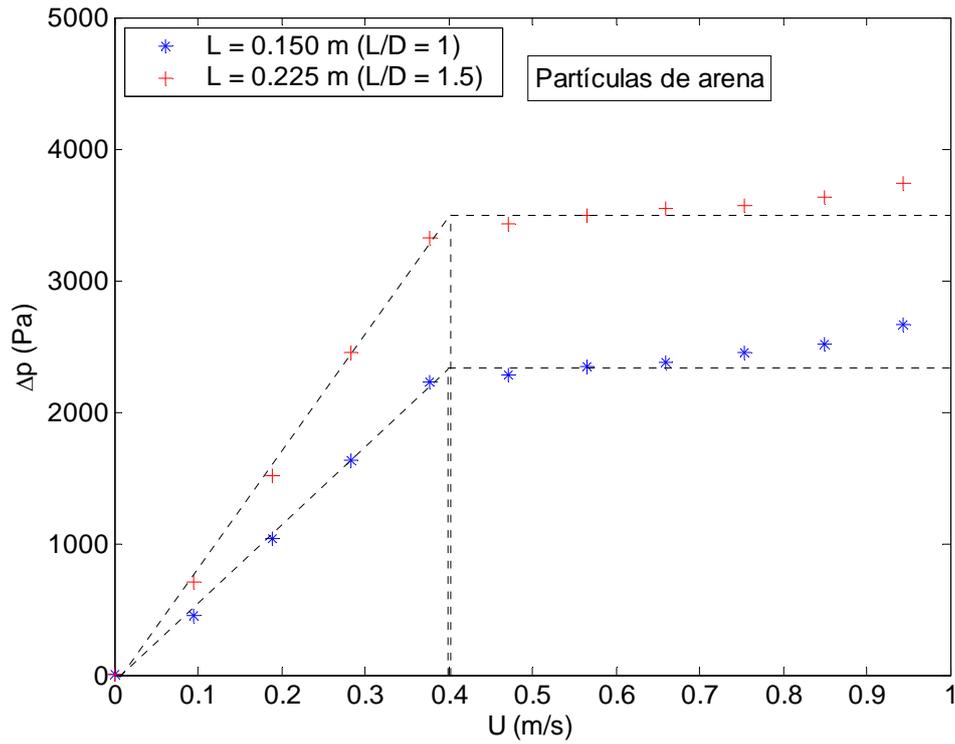


Figura 6.11. Pérdida de carga en el lecho Δp frente a la velocidad del aire U . Partículas de arena, $L/D = 1$ y $L/D = 1.5$.

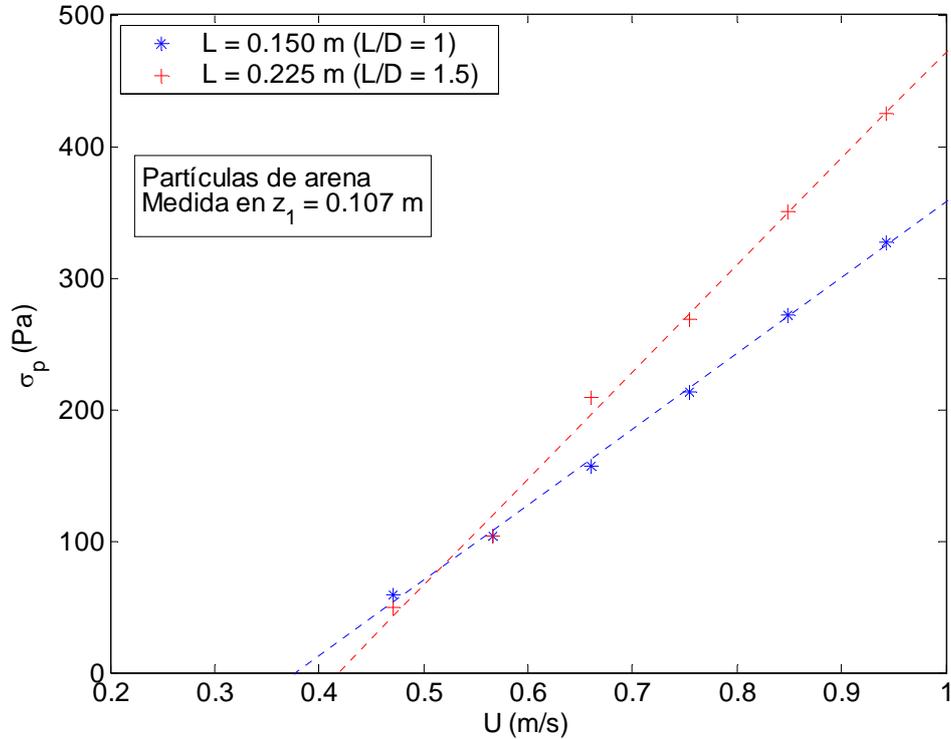


Figura 6.12. Desviación típica de las fluctuaciones σ_p frente a la velocidad del aire U . Partículas de arena, $L/D = 1$ y $L/D = 1.5$.

En la Figura 6.13 se observa como la desviación típica de las fluctuaciones de presión es mayor en el lecho de $L/D = 1.5$, para la misma relación de exceso de aire. Las fluctuaciones de presión en el lecho están influidas por la explosión de burbujas en la superficie de éste. Según Darton et al. [15], el diámetro de la burbuja crece con la altura que ésta recorre durante su ascenso a lo largo del lecho, siendo entonces más grande cuanto mayor es la altura del lecho. El que las fluctuaciones sean mayores en el lecho de mayor altura indica que la explosión de burbujas en la superficie es más pronunciada debido a que el diámetro final de éstas es mayor.

Por lo tanto, la altura de llenado del lecho fijo prácticamente no afecta a la velocidad de mínima fluidización, tal y como afirman Delebarre et al. [16] en su estudio. En cambio, las fluctuaciones de presión debidas al movimiento de las burbujas son mayores en el lecho de más altura, debido a que en éste se forman burbujas más grandes.

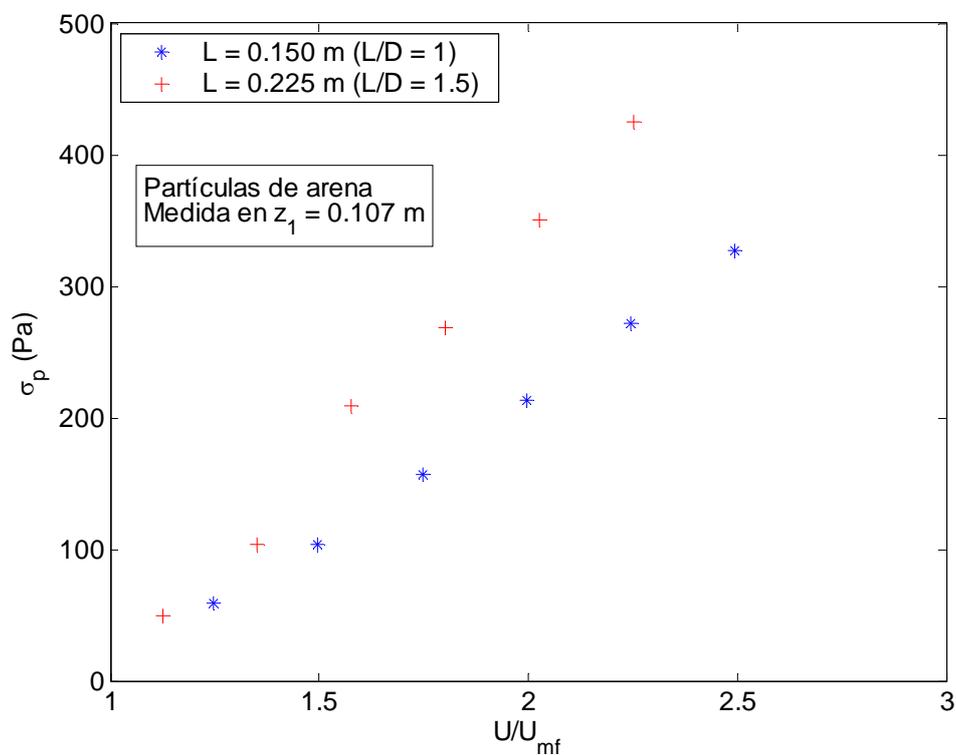


Figura 6.13. Desviación típica de las fluctuaciones σ_p frente al exceso de aire U/U_{mf} . Partículas de arena, $L/D = 1$ y $L/D = 1.5$.

Referencias bibliográficas Capítulo 6

- [5] Apartado 6.1
- [1] [14] Apartado 6.2
- [13] Apartado 6.3
- [15] [16] Apartado 6.4.3

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

La realización de este trabajo ha comprendido diferentes puntos, que se resumen a continuación:

- Diseño de una instalación experimental de lecho fluidizado, de pared cilíndrica con diámetro $D = 0.150$ m, para fluidización de gas-sólido.
- Implementación de un sistema de adquisición de datos para la medida de series de presión en el lecho, configurando el conjunto formado por transductor, tarjeta de adquisición de datos y ordenador personal, junto con la aplicación informática de adquisición DASyLab.
- Ensayo de fluidización mediante aire de dos tipos de partículas (arena de sílice y microesferas de vidrio) en dos alturas de llenado del lecho fijo diferentes ($L/D = 1$ y $L/D = 1.5$).
- Evaluación de la velocidad de mínima fluidización del lecho en las diferentes configuraciones ensayadas, mediante el método de la pérdida de carga y el análisis de la desviación típica de las fluctuaciones de presión en el lecho. Se han comparado los resultados con correlaciones teóricas.
- Estudio de la influencia de tres parámetros de interés sobre la velocidad de mínima fluidización: posición axial de los sensores de presión, propiedades de las partículas de fluidización y altura de llenado del lecho fijo.

7.1. Cálculo experimental de la velocidad de mínima fluidización

Utilizando el método de la pérdida de carga en el lecho se obtiene un error relativo (con respecto al método teórico) máximo del 15 % y medio del 8 %. Con el método de las fluctuaciones de presión el error relativo máximo es del 9 % y el medio del 4 %. Éste último método mejora la precisión con respecto al método de la pérdida de carga en el lecho, en el cual resulta complicado evaluar la zona de transición del estado de lecho fijo al de lecho fluidizado.

Por otra parte, el método de las fluctuaciones de presión tiene la ventaja de necesitar medidas únicamente en el estado de lecho fluidizado. De este modo, es posible evaluar la velocidad de mínima fluidización durante la operación, lo que resulta favorable en ciertas aplicaciones industriales en las que el valor de este parámetro puede variar a lo largo del proceso por cambios en la temperatura, la granulometría o la densidad de las partículas.

7.2. Influencia de la posición axial del sensor

Se ha medido en distintos puntos, colocados todos ellos en una misma dirección sobre la pared del lecho. Varios de ellos se encuentran a diferentes alturas por encima del distribuidor y uno en el plenum, por debajo del distribuidor.

Se ha hallado la velocidad de mínima fluidización por el método de la pérdida de carga y el de las fluctuaciones de presión en los diferentes puntos del lecho. En general, se han obtenido valores muy próximos en las distintas alturas, incluso en el plenum, donde no hay partículas.

De este modo, se comprueba que utilizando un plato distribuidor perforado es posible obtener con exactitud la velocidad de mínima fluidización, a partir de las fluctuaciones de presión medidas en el plenum. Esto es de gran utilidad pues evita problemas relacionados con la obstrucción y el deterioro por abrasión o exposición a altas temperaturas en los sensores de medida.

7.3. Influencia de las propiedades de las partículas

Se calcula la velocidad de mínima fluidización con dos tipos de partículas: arena de sílice y microesferas de vidrio. El diámetro y la densidad de partícula es mayor en la arena. La masa del lecho de partículas es muy similar en ambos casos, aunque algo superior en la arena, por lo que la fracción de vacío del lecho fijo es menor en las microesferas de vidrio.

La velocidad de mínima fluidización obtenida es mayor en el caso de las partículas de arena. De este modo, se comprueba que a mayor diámetro y densidad de las partículas se necesita una mayor velocidad del aire de entrada para alcanzar la fluidización, a igual altura de llenado del lecho.

El exceso de aire de entrada resulta en unas fluctuaciones de presión similares en los dos tipos de partículas, para una misma altura de llenado del lecho. En este caso, la formación y ascenso de burbujas en el lecho no depende de las propiedades de las partículas. Se recuerda que, aunque los dos tipos de partículas ensayadas presentan diferentes propiedades, la masa del lecho es muy próxima en los dos casos (la diferencia está en la fracción de vacío del lecho). Por ello, sería interesante comprobar, en estudios posteriores, si este comportamiento se mantiene entre partículas que constituyan lechos con mayor diferencia de masa para la misma altura de llenado.

7.4. Influencia de la altura de lecho fijo

Para cada tipo de partícula se halla la velocidad de mínima fluidización en dos alturas de llenado del lecho fijo diferentes: una altura igual al diámetro del lecho y la otra igual a 1.5 veces el diámetro. La masa del lecho de partículas es proporcional a la variación de la altura, con lo que la fracción de vacío del lecho fijo es la misma para las dos alturas ensayadas.

Aplicando el método de cálculo teórico se obtiene igual velocidad de mínima fluidización en las dos alturas, para cada tipo de partícula, puesto que la correlación empleada hace uso de la fracción de vacío en el lecho fijo que, como se ha comentado, no varía con la altura. Del mismo modo, según los métodos experimentales, la velocidad de mínima fluidización prácticamente no depende de la altura de llenado del lecho fijo.

Además, se demuestra que el exceso de aire de entrada produce mayores fluctuaciones de presión en el lecho de más altura. Principalmente, esto se debe a que la explosión de burbujas es más vigorosa en la superficie del lecho más alto, por alcanzar éstas un mayor tamaño durante su ascenso.

7.5. Estudios posteriores

El estudio se ha llevado a cabo con partículas del Grupo B de la clasificación de Geldart, donde la velocidad de mínima fluidización coincide con la de mínimo burbujeo. Se han ensayado diferentes alturas de llenado, mediante distribuidor de plato perforado con orificios dispuestos formando una matriz cuadrangular.

En relación con las configuraciones ensayadas y la instalación empleada, resultaría interesante probar con partículas que, aún siendo del mismo grupo, constituyan lechos con diferente masa para la misma altura. Al mismo tiempo, se podrían ensayar lechos con mayor diferencia entre sus alturas de llenado y comprobar si se mantiene el comportamiento aquí observado. Por otra parte, se podrían plantear ensayos con partículas del Grupo A de Geldart, donde la velocidad de mínima fluidización es algo inferior a la de mínimo burbujeo y la operación es más suave.

Para ampliar el estudio sobre la forma adecuada de medir presión media y fluctuaciones de presión en lechos fluidizados, sería interesante comprobar la influencia de las características del sensor (diámetro del sensor o medida diferencial frente a absoluta) y de la colocación de éstos en el lecho (sensor colocado al borde de la pared, enfrenteado axialmente el flujo, simetría en el lecho o posición radial del sensor).

ANEXO A

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

A. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

En este apartado se adjuntan diversos esquemas y datos que complementan algunos de los puntos definidos en el Capítulo 4 de descripción de la instalación.

A.1. Planos de la estructura del lecho

Se incluyen los planos que detallan la estructura del lecho donde se lleva a cabo el ensayo de fluidización, siendo complemento del Apartado 4.1 de descripción del lecho.

A.2. Tamaño de las partículas

Se muestran las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico, que se emplean para definir el tamaño de las partículas. El tamaño característico de cada tipo de partícula se determina mediante el diámetro de partícula, que se obtiene de forma visual comparando la superficie de las diferentes partículas con la escala que aparece en la imagen. El valor apreciado es, aproximadamente, de $d_p = 700 \mu\text{m}$ en las partículas de arena (Figura A.1) y $d_p = 600 \mu\text{m}$ en las microesferas de vidrio (Figura A.2).

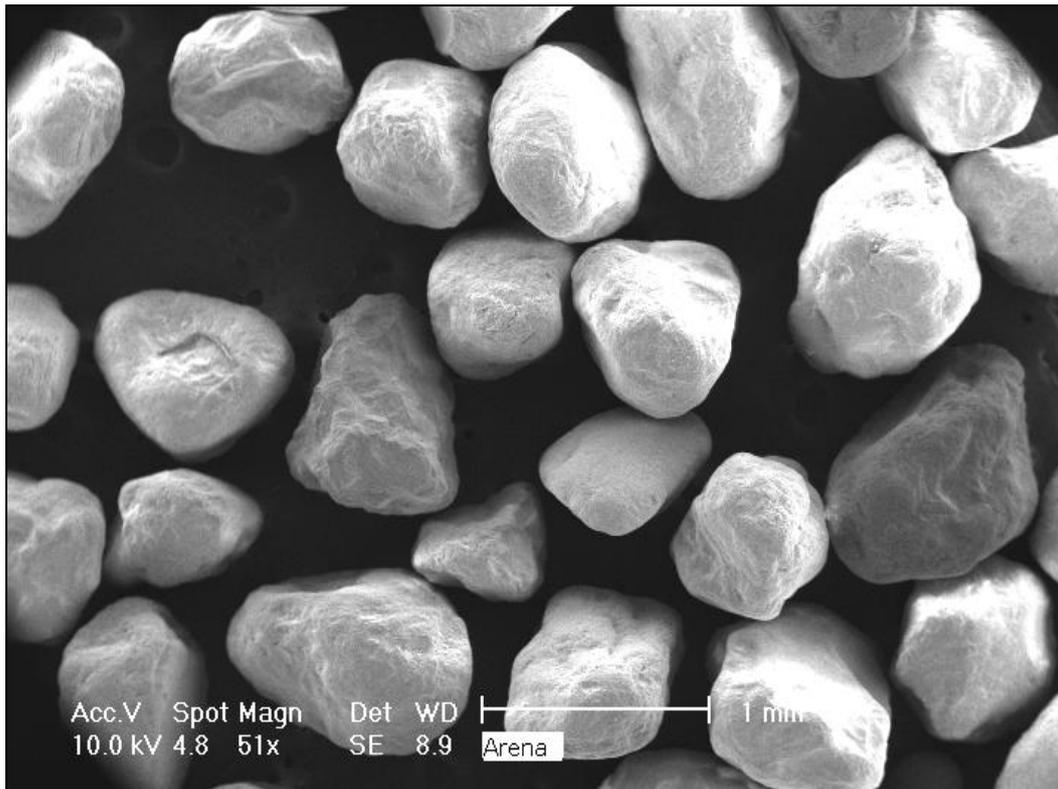


Figura A.1. Imagen al microscopio de las partículas de arena de sílice.

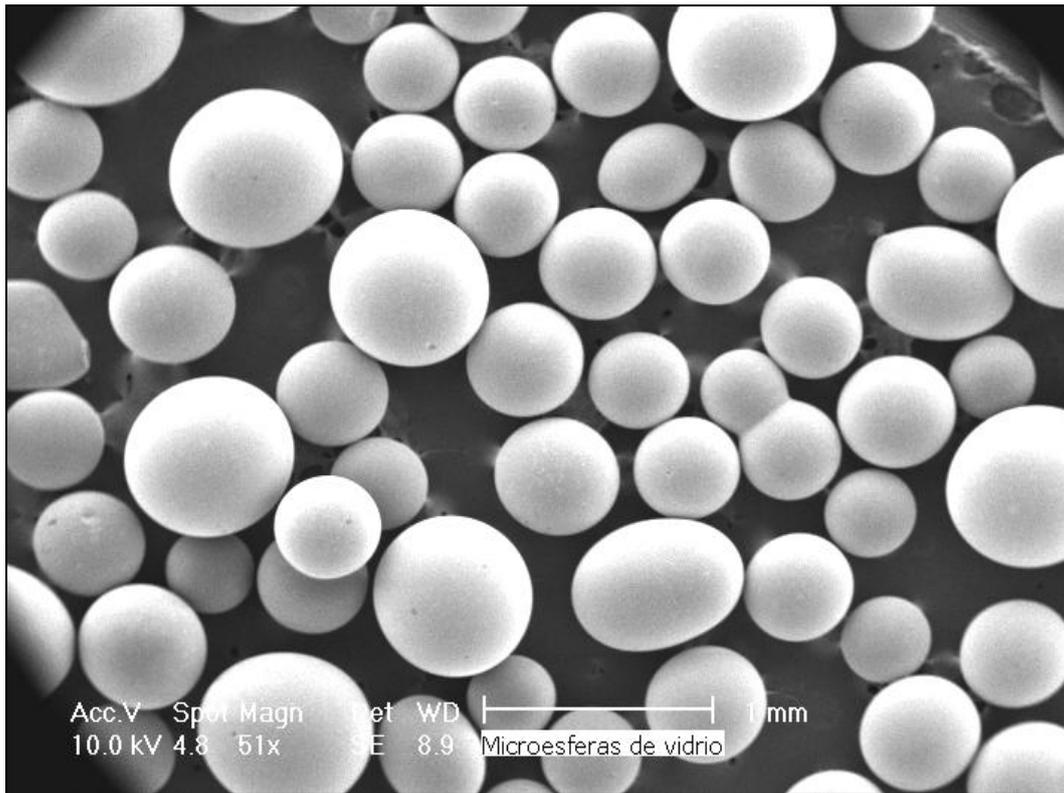


Figura A.2. Imagen al microscopio de las microesferas de vidrio.

A.3. Densidad de las partículas

Se incluye la lectura obtenida con el picnómetro en el ensayo realizado para caracterizar la densidad de las partículas. El valor obtenido es de $\rho_p = 2.651 \text{ g/cm}^3$ (Figura A.3) para las partículas de arena y $\rho_p = 2.489 \text{ g/cm}^3$ para las microesferas de vidrio (Figura A.4).

AccuPyc 1330 V3.03 Numero de Serie: 3722 Reporte de Densidad y Volumen					
ID Muestra:			Comenzado: 17/01/07	18:16:14	
Peso Muestra:	7.1386 g		Completado: 17/01/07	18:30:52	
Temperatura:	27.2 C				
Numero de Purgas:	3		Velocidad de Equil:	0.0050 psig/min	
Volumen Celda:	11.4867 cm ³		Volumen Expansion:	9.2858 cm ³	
Proc#	Volumen cm ³	Desviacion cm ³	Densidad g/cm ³	Desviacion g/cm ³	Duracion (h:m:s)
1	2.6936	0.0008	2.6502	-0.0008	0:05:32
2	2.6932	0.0004	2.6506	-0.0004	0:07:42
3	2.6930	0.0002	2.6508	-0.0002	0:09:51
4	2.6909	-0.0018	2.6528	0.0018	0:12:22
5	2.6932	0.0004	2.6506	-0.0004	0:14:30
Volumen Promedio:		2.6928 cm ³	Desviacion Standard:		0.0010 cm ³
Densidad Promedio:		2.6510 g/cm ³	Desviacion Standard:		0.0010 g/cm ³

Figura A.3. Lectura del picnómetro en la muestra de arena.

AccuPyc 1330 V3.03 Numero de Serie: 3722 Reporte de Densidad y Volumen					
ID Muestra:			Comenzado: 17/01/07	17:56:53	
Peso Muestra:	5.7777 g		Completado: 17/01/07	18:11:54	
Temperatura:	27.3 C				
Numero de Purgas:	3		Velocidad de Equil:	0.0050 psig/min	
Volumen Celda:	11.4867 cm ³		Volumen Expansion:	9.2858 cm ³	
Proc#	Volumen cm ³	Desviacion cm ³	Densidad g/cm ³	Desviacion g/cm ³	Duracion (h:m:s)
1	2.3199	-0.0010	2.4904	0.0010	0:05:52
2	2.3208	-0.0001	2.4895	0.0001	0:08:08
3	2.3212	0.0003	2.4891	-0.0003	0:10:23
4	2.3212	0.0003	2.4891	-0.0003	0:12:40
5	2.3213	0.0004	2.4890	-0.0005	0:14:53
Volumen Promedio:		2.3209 cm ³	Desviacion Standard:		0.0006 cm ³
Densidad Promedio:		2.4894 g/cm ³	Desviacion Standard:		0.0006 g/cm ³

Figura A.4. Lectura del picnómetro en la muestra de microesferas de vidrio.

ANEXO B

MEDIDAS Y CÁLCULOS

B. MEDIDAS Y CÁLCULOS

En este anexo se incluyen los códigos desarrollados con la aplicación Matlab para calcular la velocidad de mínima fluidización, según los criterios de aplicación de los métodos de cálculo experimentales (Apartado 5.3) y el método teórico (Apartado 5.4), particularizando para la configuración de arena con $L/D = 1$.

B.1. Aplicación de los métodos de cálculo experimentales

%VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN: MÉTODOS EXPERIMENTALES

%ARENA, L=0.150 m (L/D=1)

clear

%Vector de caudales (1000-0 l/min)

Q=[1000 900 800 700 600 500 400 300 200 100 0];

D=0.150; **%diámetro del lecho(m)**

A=pi*D^2/4; **%área del lecho (m2)**

%Vector de velocidades (m/s)

U=(A*6e4).\Q;

%Cálculo de pérdida de carga en el distribuidor (para cada caudal)

%Lectura de datos de tensión (V) (1000-0 l/min)

Vd1000=dlmread('PF150207.14.ASC','t',10,0);

Vd900=dlmread('PF150207.15.ASC','t',10,0);

Vd800=dlmread('PF150207.16.ASC','t',10,0);

Vd700=dlmread('PF150207.17.ASC','t',10,0);

Vd600=dlmread('PF150207.18.ASC','t',10,0);

Vd500=dlmread('PF150207.19.ASC','t',10,0);

Vd400=dlmread('PF150207.20.ASC','t',10,0);

Vd300=dlmread('PF150207.21.ASC','t',10,0);

Vd200=dlmread('PF150207.22.ASC','t',10,0);

Vd100=dlmread('PF150207.23.ASC','t',10,0);

Vd0=dlmread('PF150207.24.ASC','t',10,0);

%Pérdida de carga en el distribuidor (Pa)

ad=500; bd=-25; **%función de transferencia transductor nº1 10"**

pdm1000=mean(ad.*Vd1000(:,2)+bd);

pdm900=mean(ad.*Vd900(:,2)+bd);

pdm800=mean(ad.*Vd800(:,2)+bd);

pdm700=mean(ad.*Vd700(:,2)+bd);

pdm600=mean(ad.*Vd600(:,2)+bd);

pdm500=mean(ad.*Vd500(:,2)+bd);

pdm400=mean(ad.*Vd400(:,2)+bd);

pdm300=mean(ad.*Vd300(:,2)+bd);

pdm200=mean(ad.*Vd200(:,2)+bd);

pdm100=mean(ad.*Vd100(:,2)+bd);

pdm0=mean(ad.*Vd0(:,2)+bd);

Dpd=[pdm1000 pdm900 pdm800 pdm700 pdm600 pdm500 pdm400 pdm300...
pdm200 pdm100 pdm0];

%Cálculo de pérdida de carga en el lecho (para cada caudal)

%Lectura de datos de tensión (V) (1000-0 l/min)

```
V1000=dlmread('PF270207.11.ASC','t',13,0);
V900=dlmread('PF270207.12.ASC','t',13,0);
V800=dlmread('PF270207.13.ASC','t',13,0);
V700=dlmread('PF270207.14.ASC','t',13,0);
V600=dlmread('PF270207.15.ASC','t',13,0);
V500=dlmread('PF270207.16.ASC','t',13,0);
V400=dlmread('PF270207.17.ASC','t',13,0);
V300=dlmread('PF270207.18.ASC','t',13,0);
V200=dlmread('PF270207.19.ASC','t',13,0);
V100=dlmread('PF270207.20.ASC','t',13,0);
V0=dlmread('PF270207.21.ASC','t',13,0);
```

%Presión media en el plenum (Pa)

aPL=1500; bPL=0; %función de transferencia transductor n°4 30"

```
pm1000PL=mean(aPL.*V1000(:,5)+bPL);
pm900PL=mean(aPL.*V900(:,5)+bPL);
pm800PL=mean(aPL.*V800(:,5)+bPL);
pm700PL=mean(aPL.*V700(:,5)+bPL);
pm600PL=mean(aPL.*V600(:,5)+bPL);
pm500PL=mean(aPL.*V500(:,5)+bPL);
pm400PL=mean(aPL.*V400(:,5)+bPL);
pm300PL=mean(aPL.*V300(:,5)+bPL);
pm200PL=mean(aPL.*V200(:,5)+bPL);
pm100PL=mean(aPL.*V100(:,5)+bPL);
pm0PL=mean(aPL.*V0(:,5)+bPL);
pPL=[pm1000PL pm900PL pm800PL pm700PL pm600PL pm500PL pm400PL...
      pm300PL pm200PL pm100PL pm0PL];
```

%Presión media en z6=0.520 m (z/D=3.47) (Pa)

az6=500; bz6=-25; %función de transferencia transductor n°3 10"

```
pm1000z6=mean(az6.*V1000(:,6)+bz6);
pm900z6=mean(az6.*V900(:,6)+bz6);
pm800z6=mean(az6.*V800(:,6)+bz6);
pm700z6=mean(az6.*V700(:,6)+bz6);
pm600z6=mean(az6.*V600(:,6)+bz6);
pm500z6=mean(az6.*V500(:,6)+bz6);
pm400z6=mean(az6.*V400(:,6)+bz6);
pm300z6=mean(az6.*V300(:,6)+bz6);
pm200z6=mean(az6.*V200(:,6)+bz6);
pm100z6=mean(az6.*V100(:,6)+bz6);
pm0z6=mean(az6.*V0(:,6)+bz6);
pz6=[pm1000z6 pm900z6 pm800z6 pm700z6 pm600z6 pm500z6 pm400z6...
      pm300z6 pm200z6 pm100z6 pm0z6];
```

DpL=pPL-Dpd-pz6; %pérdida de carga en el lecho (Pa)

Ua=U(1:6); Ub=U(7:11);

DpLa=DpL(1:6); %pérdida de carga en la zona de lecho fluidizado (Pa)

DpLb=DpL(7:11); %pérdida de carga en la zona de lecho fijo (Pa)

```

%Regresión lineal de la pérdida de carga en la zona de lecho fijo
reg_DpLb=polyfit(Ub,DpLb,1); %coeficientes a y b
mlg_A=2330; %peso por unidad de área transversal del lecho (Pa)
UmfDpL=(mlg_A-reg_DpLb(2))/reg_DpLb(1) %velocidad de min. fluidización (m/s)

```

```

%Cálculo de la desviación típica de las fluctuaciones de presión
%Se representa la desviación típica de las fluctuaciones con valores mayores que cero
%Previamente, se ha comprobado que estas desviaciones tienen lugar para caudales
%mayores de 500 l/min aproximadamente en la configuración ensayada

```

```

%Desviación típica en z0=0.062 m (z/D=0.41) (Pa)
az0=500; bz0=-25; %función de transferencia transductor nº1 10"
stdp1000z0=std(az0.*V1000(:,2)+bz0);
stdp900z0=std(az0.*V900(:,2)+bz0);
stdp800z0=std(az0.*V800(:,2)+bz0);
stdp700z0=std(az0.*V700(:,2)+bz0);
stdp600z0=std(az0.*V600(:,2)+bz0);
stdp500z0=std(az0.*V500(:,2)+bz0);
stdpz0=[stdp1000z0 stdp900z0 stdp800z0 stdp700z0 stdp600z0 stdp500z0];

```

```

%Desviación típica en z1=0.107 m (z/D=0.71) (Pa)
az1=500; bz1=-25; %función de transferencia transductor nº2 10"
stdp1000z1=std(az1.*V1000(:,3)+bz1);
stdp900z1=std(az1.*V900(:,3)+bz1);
stdp800z1=std(az1.*V800(:,3)+bz1);
stdp700z1=std(az1.*V700(:,3)+bz1);
stdp600z1=std(az1.*V600(:,3)+bz1);
stdp500z1=std(az1.*V500(:,3)+bz1);
stdpz1=[stdp1000z1 stdp900z1 stdp800z1 stdp700z1 stdp600z1 stdp500z1];

```

```

%Desviación típica en el plenum (Pa)
stdp1000PL=std(aPL.*V1000(:,5)+bPL);
stdp900PL=std(aPL.*V900(:,5)+bPL);
stdp800PL=std(aPL.*V800(:,5)+bPL);
stdp700PL=std(aPL.*V700(:,5)+bPL);
stdp600PL=std(aPL.*V600(:,5)+bPL);
stdp500PL=std(aPL.*V500(:,5)+bPL);
stdpPL=[stdp1000PL stdp900PL stdp800PL stdp700PL stdp600PL stdp500PL];

```

```

%Vector de caudales (1000-500 l/min)
%Tramo con fluctuaciones de presión mayores que cero
Qp=[1000 900 800 700 600 500];
%Vector de velocidades (m/s)
Up=(A*6e4).\Qp;

```

```

%Regresión lineal de la desviación típica de las fluctuaciones
%z0=0.062 m (z/D=0.41)
reg_stdpz0=polyfit(Up,stdpz0,1); %coeficientes a y b
lt_stdpz0=reg_stdpz0(1).*Up+reg_stdpz0(2); %línea de tendencia
Umfz0=-reg_stdpz0(2)/reg_stdpz0(1) %velocidad de mínima fluidización (m/s)

```

```
%z1=0.107 m (z/D=0.71)
```

```
reg_stdpz1=polyfit(Up,stdpz1,1); %coeficientes a y b
```

```
lt_stdpz1=reg_stdpz1(1).*Up+reg_stdpz1(2); %línea de tendencia
```

```
Umfz1=-reg_stdpz1(2)/reg_stdpz1(1) %velocidad de mínima fluidización (m/s)
```

```
%Plenum
```

```
reg_stdpPL=polyfit(Up,stdpPL,1); %coeficientes a y b
```

```
lt_stdpPL=reg_stdpPL(1).*Up+reg_stdpPL(2); %línea de tendencia
```

```
UmfPL=-reg_stdpPL(2)/reg_stdpPL(1) %velocidad de mínima fluidización (m/s)
```

```
%Gráfica de pérdida de carga frente a velocidad
```

```
figure(1);plot(Ua,DpLa,'b*',Ub,DpLb,'b*','MarkerSize',8)
```

```
xlabel('U (m/s)','FontSize',14)
```

```
ylabel('\Delta p (Pa)','FontSize',14)
```

```
%Gráfica de desviación típica de las fluctuaciones frente a velocidad
```

```
figure(2);plot(Up,stdpz0,'b*',Up,stdpz1,'r+',Up,stdpPL,'md',Up,lt_stdpz0,'b:',...
```

```
Up,lt_stdpz1,'r:',Up,lt_stdpPL,'m:','MarkerSize',8)
```

```
xlabel('U (m/s)','FontSize',14)
```

```
ylabel('\sigma_p (Pa)','FontSize',14)
```

```
legend('z_0 = 0.062 m','z_1 = 0.107 m','Plenum')
```

B.2. Aplicación del método de cálculo teórico

%VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN: MÉTODO TEÓRICO

%ARENA, L=0.150 m (L/D=1)

clear

rhop=2651; %densidad de partícula (kg/m3)

dp=700*10^-6; %diámetro de partícula (m)

rhog=1.2101; %densidad del aire a 290 K (kg/m3)

myg=1.796*10^-5; %viscosidad dinámica del aire a 290 K (kg/m*s)

mb=4.2; %masa del lecho de partículas (kg)

D=0.15; %diámetro del lecho (m)

L=1*D; %altura de llenado del lecho fijo (m)

Vap=pi*(D^2)*L/4; %volumen aparente del lecho (m3)

rhob=mb/Vap; %densidad aparente del lecho (kg/m3)

epsilon=1-(rhob/rhop); %fracción de vacío del lecho fijo ()

g=9.81; %aceleración de la gravedad (m/s2)

%Términos de la Ecuación (3.5)

a=(1-epsilon)*(rhob-rhog)*g;

b=(150*((1-epsilon)^2)*myg)/((epsilon^3)*(dp^2));

c=(1.75*(1-epsilon)*rhog)/((epsilon^3)*dp);

%Velocidad de mínima fluidización (m/s)

U=0;

e=1; %error

it=0; %número de iteraciones

while e>10^-7 & it<500

 Uold=U;

 U=a/(Uold*c+b)

 e=max(max(abs(U-Uold)));

 it=it+1

end

ANEXO C

RESULTADOS: VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN

C. RESULTADOS: VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN

En este anexo se detallan los resultados del cálculo de la velocidad de mínima fluidización para las diferentes configuraciones, complementando así la información descrita en el Apartado 6.4. Los resultados correspondientes a cada configuración se recogen en una tabla, con un apartado (a) para el método de la pérdida de carga en el lecho y otro apartado (b) para el método de la desviación típica de las fluctuaciones de presión. Las cabeceras de las columnas en cada apartado de la tabla se refieren a:

- Método de la pérdida de carga (a). Parámetros a y b : obtenidos por regresión lineal de los datos correspondientes al lecho fijo; $m_b g/A$: peso del lecho de partículas entre la sección transversal de éste; U_{mf} : velocidad de mínima fluidización obtenida por este método de pérdida de carga; $U_{mf_teórico}$: velocidad de mínima fluidización obtenida por el método teórico; Err : error relativo entre U_{mf} y $U_{mf_teórico}$.
- Método de la desviación típica de las fluctuaciones (b). Parámetros a y b : obtenidos por regresión lineal de los datos correspondientes al lecho fluidizado (aparición de fluctuaciones); R : coeficiente de correlación entre la desviación típica de las fluctuaciones y la velocidad del aire; U_{mf} : velocidad de mínima fluidización hallada por este método de las fluctuaciones; $U_{mf_teórico}$: velocidad de mínima fluidización según el método teórico; Err : error relativo entre U_{mf} y $U_{mf_teórico}$.

Además, se representan las gráficas de pérdida de carga en el lecho y desviación típica de las fluctuaciones de presión (en los distintos puntos de medida) frente a la velocidad del aire de entrada, correspondientes a las distintas configuraciones. En las gráficas de pérdida de carga, las líneas discontinuas indican la recta de lecho fijo y la ordenada de $m_b g/A$; la intersección entre ambas determina la velocidad de mínima fluidización. En la gráfica de la desviación típica de las fluctuaciones, las líneas discontinuas definen la recta de relación lineal entre la desviación típica y la velocidad del aire de entrada; la intersección con la ordenada de desviación típica nula da la velocidad de mínima fluidización.

C.1. Partículas de arena, $L = 0.150$ m ($L/D = 1$)

(a)	Medida $\Delta p - U$	a (Pa)	b (kg/sm ²)	$m_b g/A$ (Pa)	U_{mf} (m/s)	$U_{mf_teórico}$ (m/s)	Err (%)
	Lecho	- 44	5952	2330	0.399	0.381	4.7

(b)	Medida $\sigma_p - U$	a (Pa)	b (kg/sm ²)	R ()	U_{mf} (m/s)	$U_{mf_teórico}$ (m/s)	Err (%)
	$z_0 = 0.062$ m	- 171	480	0.999	0.356	0.381	7.0
	$z_1 = 0.107$ m	- 218	576	0.999	0.378		0.8
	Plenum	- 117	323	0.998	0.362		5.2

Tabla C.1. Velocidad de mínima fluidización. Arena, $L/D = 1$:

(a) Pérdida de carga en el lecho; (b) Desviación típica de las fluctuaciones de presión.

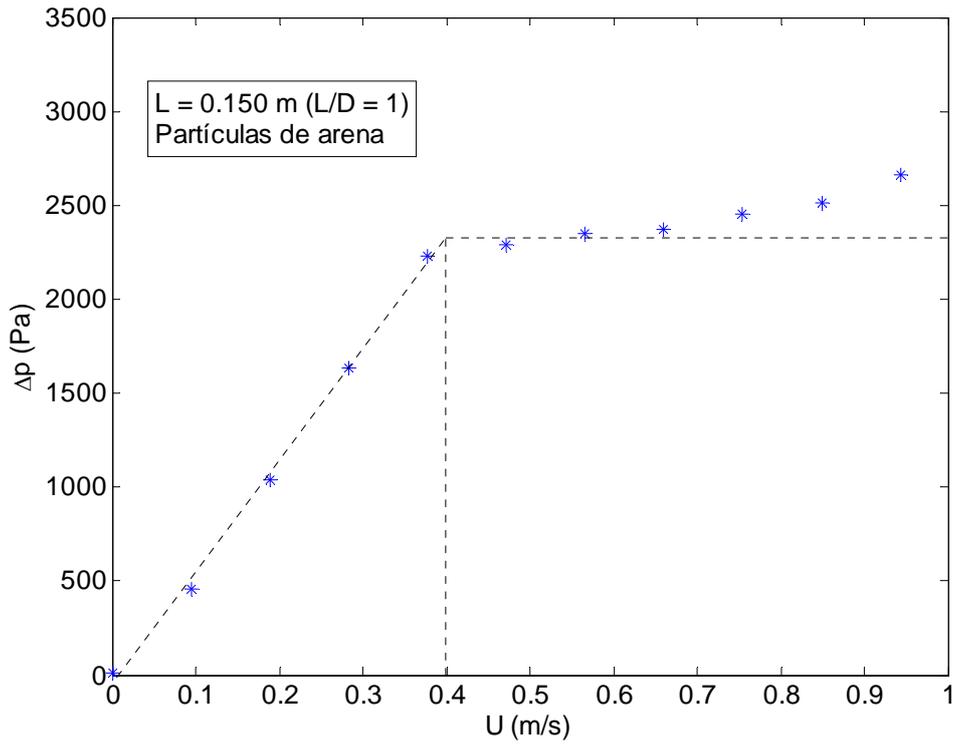


Figura C.1. Pérdida de carga en el lecho Δp frente a velocidad del aire de entrada U . Arena, $L/D = 1$.

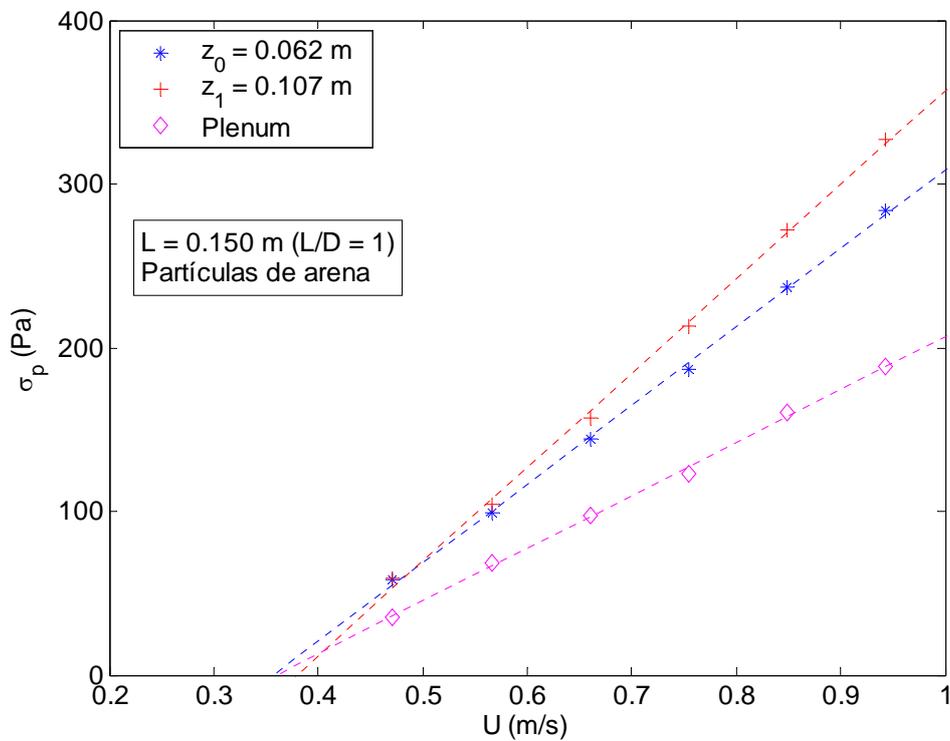


Figura C.2. Desviación típica de las fluctuaciones de presión σ_p frente a velocidad del aire de entrada U . Arena, $L/D = 1$.

C.2. Partículas de arena, $L = 0.225$ m ($L/D = 1.5$)

(a) Medida $\Delta p - U$	a (Pa)	b (kg/sm ²)	$m_b g/A$ (Pa)	U_{mf} (m/s)	$U_{mf_teórico}$ (m/s)	Err (%)
Lecho	-75	8876	3500	0.403	0.381	5.5

(b) Medida $\sigma_p - U$	a (Pa)	b (kg/sm ²)	R ()	U_{mf} (m/s)	$U_{mf_teórico}$ (m/s)	Err (%)
$z_1 = 0.107$ m	-340	812	0.998	0.419	0.381	9.1
$z_2 = 0.152$ m	-417	1111	0.998	0.375		1.6
$z_3 = 0.197$ m	-359	917	0.998	0.392		2.8
Plenum	-298	740	0.996	0.403		5.5

Tabla C.2. Velocidad de mínima fluidización. Arena, $L/D = 1.5$:

(a) Pérdida de carga en el lecho; (b) Desviación típica de las fluctuaciones de presión.

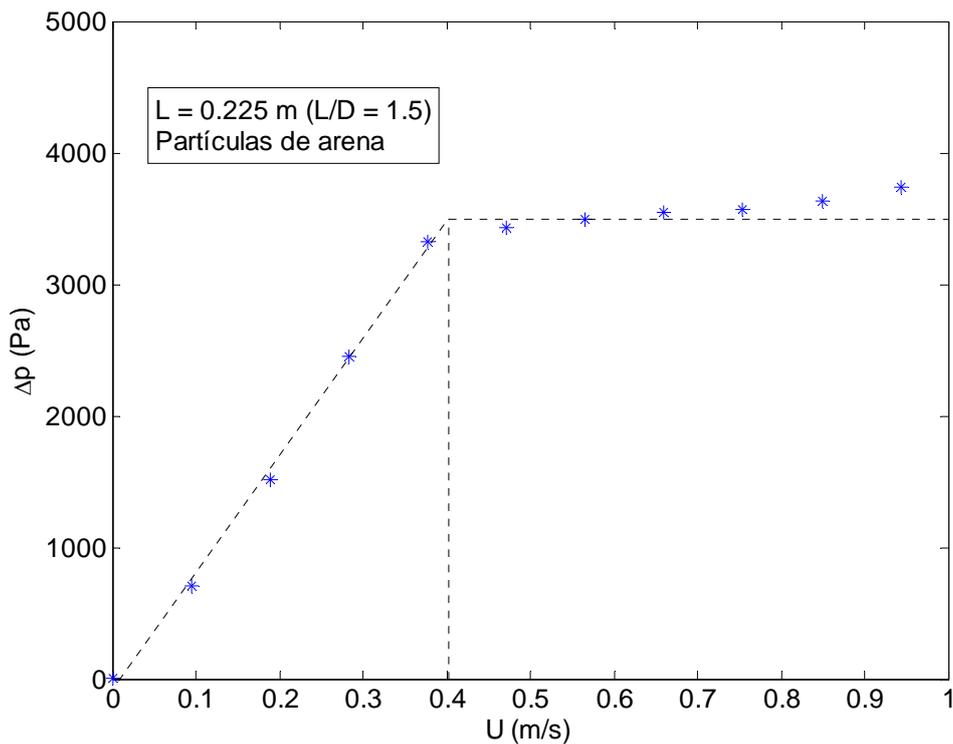


Figura C.3. Pérdida de carga en el lecho Δp frente a velocidad del aire de entrada U . Arena, $L/D = 1.5$.

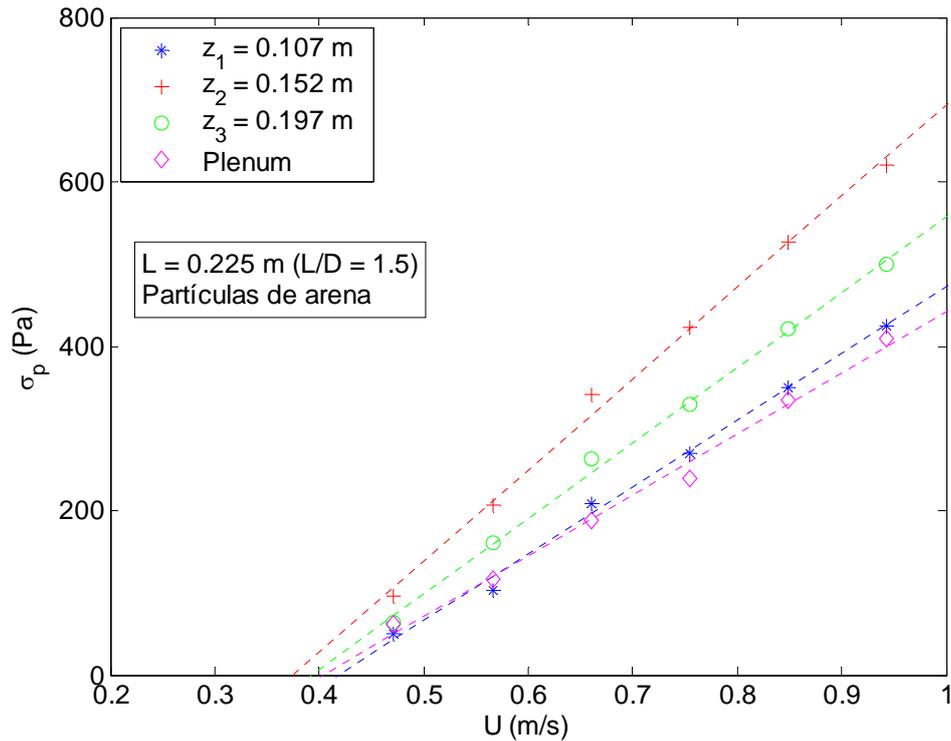


Figura C.4. Desviación típica de las fluctuaciones de presión σ_p frente a velocidad del aire de entrada U . Arena, $L/D = 1.5$.

C.3. Microesferas de vidrio, $L = 0.150$ m ($L/D = 1$)

(a)	Medida $\Delta p - U$	a (Pa)	b (kg/sm ²)	$m_b g/A$ (Pa)	U_{mf} (m/s)	$U_{mf_teórico}$ (m/s)	Err (%)
	Lecho	- 40	8907	2270	0.259	0.241	6.9

(b)	Medida $\sigma_p - U$	a (Pa)	b (kg/sm ²)	R ()	U_{mf} (m/s)	$U_{mf_teórico}$ (m/s)	Err (%)
	$z_0 = 0.062$ m	- 153	620	0.992	0.247	0.241	2.4
	$z_1 = 0.107$ m	- 136	575	0.990	0.236		2.1
	Plenum	- 104	409	0.997	0.254		5.1

Tabla C.3. Velocidad de mínima fluidización. Microesferas de vidrio, $L/D = 1$:
(a) Pérdida de carga en el lecho; (b) Desviación típica de las fluctuaciones de presión.

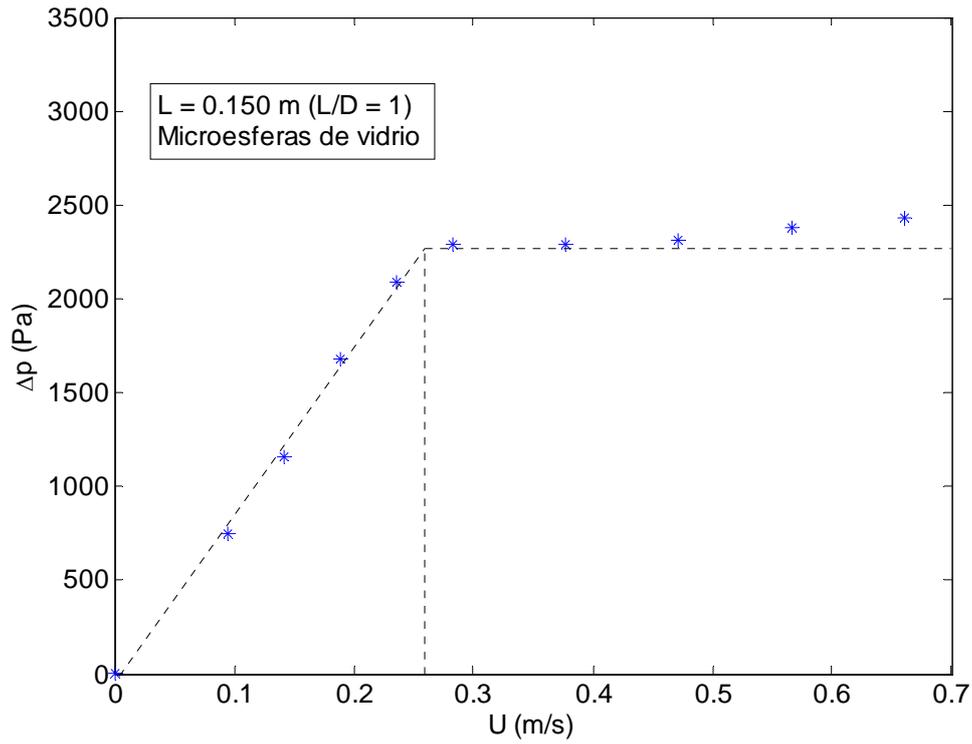


Figura C.5. Pérdida de carga en el lecho Δp frente a velocidad del aire de entrada U . Microesferas de vidrio, $L/D = 1$.

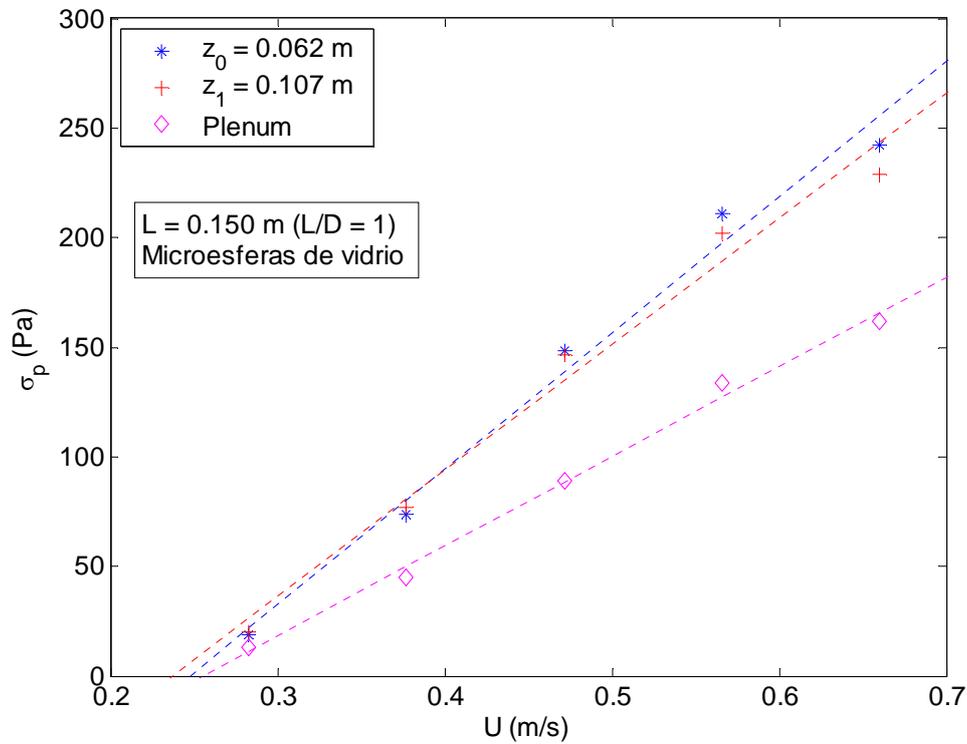


Figura C.6. Desviación típica de las fluctuaciones de presión σ_p frente a velocidad del aire de entrada U . Microesferas de vidrio, $L/D = 1$.

C.4. Microesferas de vidrio, $L = 0.225$ m ($L/D = 1.5$)

(a)

Medida $\Delta p - U$	a (Pa)	b (kg/sm ²)	$m_b g/A$ (Pa)	U_{mf} (m/s)	$U_{mf_teórico}$ (m/s)	Err (%)
Lecho	- 27	12030	3410	0.286	0.241	15.7

(b)

Medida $\sigma_p - U$	a (Pa)	b (kg/sm ²)	R ()	U_{mf} (m/s)	$U_{mf_teórico}$ (m/s)	Err (%)
$z_1 = 0.107$ m	- 167	667	0.986	0.250	0.241	3.6
$z_2 = 0.152$ m	- 298	1177	0.969	0.253		4.7
$z_3 = 0.197$ m	- 226	882	0.960	0.256		5.9
Plenum	- 154	650	0.967	0.237		1.7

Tabla C.4. Velocidad de mínima fluidización. Microesferas de vidrio, $L/D = 1.5$:
(a) Pérdida de carga en el lecho; (b) Desviación típica de las fluctuaciones de presión.

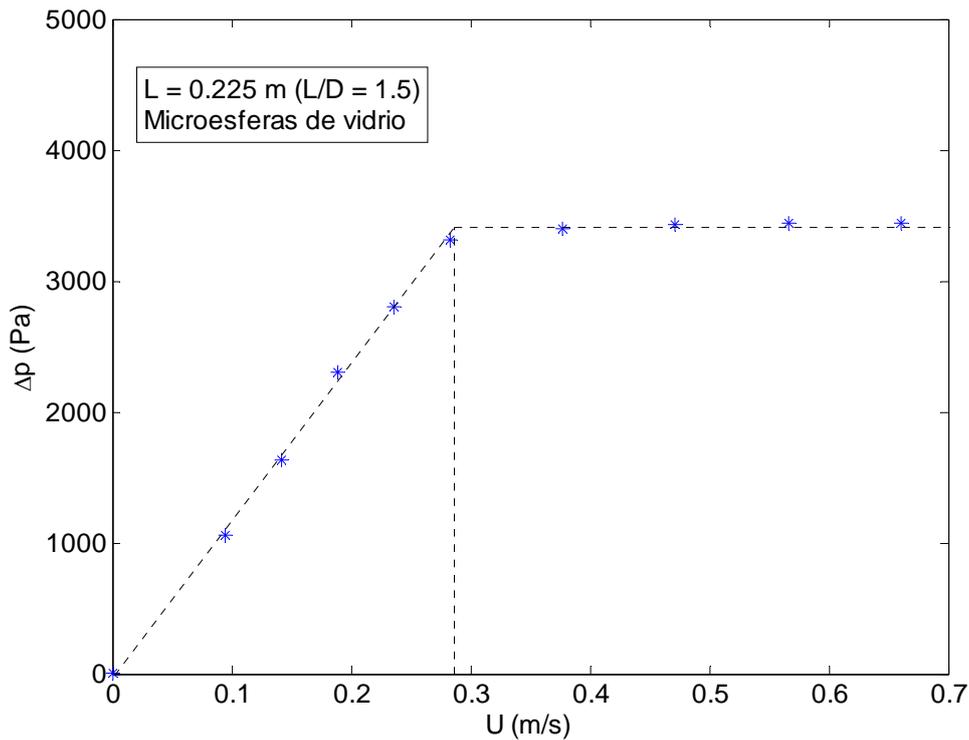


Figura C.7. Pérdida de carga en el lecho Δp frente a velocidad del aire de entrada U . Microesferas de vidrio, $L/D = 1.5$.

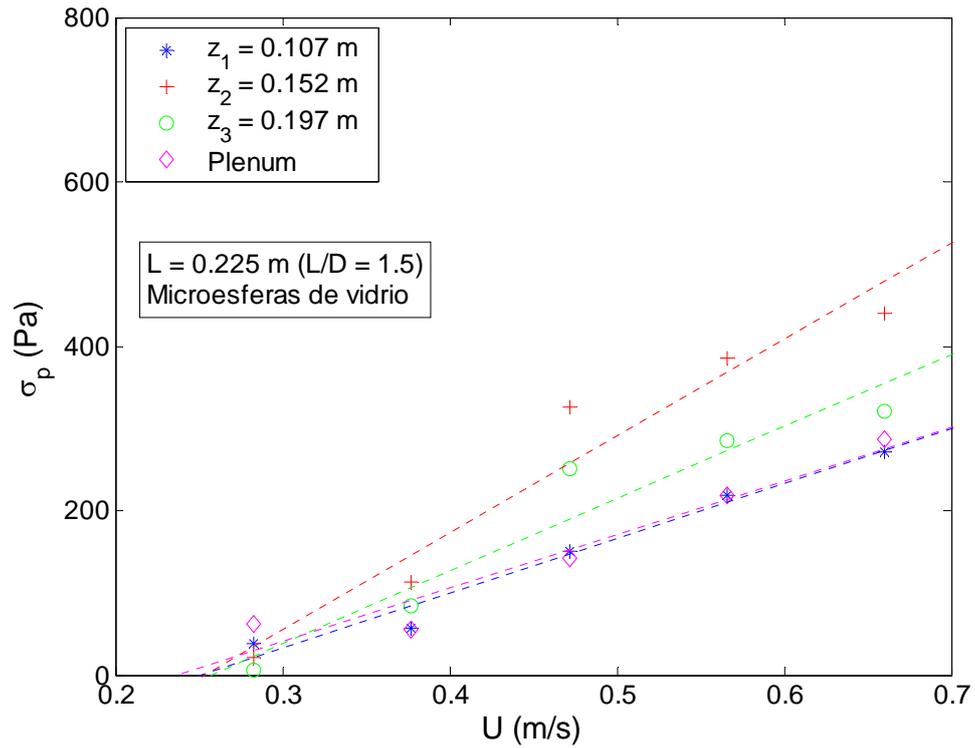


Figura C.8. Desviación típica de las fluctuaciones de presión σ_p frente a velocidad del aire de entrada U . Microesferas de vidrio, $L/D = 1.5$.

BIBLIOGRAFÍA**Libros y artículos**

- [1] D. Kunii, O. Levenspiel, Fluidization Engineering, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann (1991)
- [2] M. Rhodes, Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons (1998)
- [3] J. F. Davidson, D. Harrison, Fluidised Particles, Cambridge University Press (1963)
- [4] M. Puncochar, J. Drahos, J. Cermak, K. Selucky, Evaluation of Minimum Fluidizing Velocity in Gas Fluidized Bed from Pressure Fluctuations, Chemical Engineering Communications, 35 (1985) 81 – 87
- [5] D. Wilkinson, Determination of Minimum Fluidization Velocity by Pressure Fluctuation Measurement, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 73 (1995) 562 – 565
- [6] S. Ergun, Fluid Flow Through Packed Columns, Chemical Engineering Progress, 48 (1952) 84 – 94
- [7] R.M. Davies, S.G. Taylor, The Mechanics of Large Bubbles Rising Through Extended Liquids and Through Liquids in Tubes, Proceedings of the Royal Society A, 200 (1950) 375 – 390
- [8] C. Fryer, O. Potter, Countercurrent Backmixing Model for Fluidized Bed Catalytic Reactors. Applicability of Simplified Solutions, Industrial Engineering Chemistry Fundamentals, 11 (1972) 338 – 344
- [9] D. Geldart, Types of Gas Fluidization, Powder Technology, 7 (1973) 285 – 292
- [10] C. Sobrino, J.A. Almendros-Ibáñez, D. Santana, M. de Vega, Fluidization of Group B particles with a rotating distributor, Powder Technology (en revisión)
- [11] J. Verloop, P.M. Heertjes, Periodic Pressure Fluctuations in Fluidized Beds, Chemical Engineering Science, 29 (1974), 1035 – 1042
- [12] D. Bai, E. Shibuya, N. Nakagawa, K. Kato, Characterization of Gas Fluidization Regimes Using Pressure Fluctuations, Powder Technology, 87 (1996) 105 – 111
- [13] Z. Chen, L.G. Gibilaro, P.U. Foscolo, Fluid Pressure Loss in Slugging Fluidized Beds, Chemical Engineering Science, 52 (1997) 55 – 62
- [14] J.W. Hiby, Critical Minimum Pressure Drop of Gas Distributor Plate in Fluidized Bed Units, Chemical Engineering Technology, 36 (1964) 328

- [15] R.C. Darton, R.D. LaNauze, J.F. Davidson, D. Harrison, Bubble Growth Due to Coalescence in Fluidized Beds, Transactions Institution Chemical Engineers, 55 (1977) 274 – 280
- [16] A. Delebarre, J.M. Morales, L. Ramos, Influence of the Bed Mass on its Fluidization Characteristics, Chemical Engineering Journal, 98 (2004) 81 – 88
- [17] A.M. Lázaro, LabVIEW, Programación Gráfica para el Control de Instrumentación, Paraninfo (2001)

Manuales

- [18] ICP DAS PCI-1602 Hardware User's Manual
- [19] ICP DAS DB-1825 User's Manual

Páginas Web

- [20] www.comessa.fr
- [21] www.allgaier.de
- [22] www.niroinc.com
- [23] www.setra.com
- [24] www.omega.com
- [25] www.dasylab.com