

CAPÍTULO 3

PRINCIPIOS DE FLUIDIZACION

La fluidización es un proceso en el cual se hace pasar un fluido en forma vertical en un lecho de partículas sólidas, hasta que se logra una mezcla homogénea entre el fluido y las partículas. En este estado las partículas se comportan como el fluido en el que están, y por lo tanto fluyen en respuesta a los gradientes de presión a los cuales están sometidos. Lo que se quiere conseguir es separar las partículas de un sólido lo suficiente para obtener una movilidad general; cuando estas partículas se empiezan a separar esto significa que el fluido ha igualado el peso de las partículas por medio de las fuerzas de arrastre y esto es gracias al incremento de la velocidad de fluidización.

El gas que fluye en el lecho forma vacíos que parecen burbujas en algunos sistemas; con velocidades altas el vacío se vuelve mayor por lo que las burbujas pierden su figura semicircular, a pesar de esto se seguirá llamando *fase de burbuja*. Cuando existen más sólidos presentes en el lecho se llama *fase de emulsión*.

A bajos rangos de flujos o velocidades, las partículas sólidas reposan una sobre la otra en la columna, es entonces cuando se dice que las partículas se encuentran en estado del lecho fijo.

3.1 Clasificación

Según Liang-Shih Fan (1989) el movimiento de la partícula puede ser dividido principalmente en tres regímenes: el régimen de lecho fijo, régimen de lecho expandible y el régimen de lecho transportable. El régimen de lecho fijo existe cuando la fuerza de arrastre en las partículas inducidas por el flujo de una mezcla gas- líquido es mas

pequeña que el peso de las partículas en el sistema. Cuando con un incremento en la velocidad del gas y/o líquido, la fuerza de arrastre contrarresta el peso de las partículas, lecho se encuentra en un estado de fluidización mínima, y marca el comienzo del régimen de lecho expandible. Con un incremento adicional en la velocidad del gas y/o líquido mas allá de la velocidad mínima de fluidización, la operación esta en el régimen de lecho expandible hasta que la velocidad de gas o liquido incrementa la velocidad Terminal de la partícula en el medio gas- liquido (U_t). En una velocidad gas- liquido, la operación se encuentra en el régimen de lecho transportable.

3.2 Estados de un Lecho

Un lecho comprende el estado fijo y el estado fluidizado. Se le conoce como estado fijo cuando la diferencia de presión varía con la velocidad, esto es cuando las velocidades son más pequeñas que la velocidad mínima de fluidización, con lo que las partículas permanecen a una altura constante. En el estado fluidizado las partículas comienzan a suspenderse y la altura entre estas cambia, esto se debe a que la velocidad que alcanza es la velocidad mínima de fluidización. Existen algunos modos de fluidización, los cuales se clasifican según la concentración y comportamiento de las partículas. En la figura 3.1 se puede observar la forma en la que el lecho se comporta como resultado de la fase en la que se encuentra y la dirección a la que es inyectado el fluido.

Expanded Bed Regime in Gas-Liquid-Solid Fluidization	Mode Designation	E-I-a-1	E-I-a-2	E-I-b	E-II-a-1	E-II-a-2	E-II-b	E-III-a	E-III-b	
	Schematic Diagram									
	Continuous Phase	Liquid			Gas			Liquid		
	Flow Direction	Cocurrent Up-Flow				Countercurrent Flow			Gas Up-Flow Liquid-Batch	
	References (Chapters)	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, A		1, 4, 6, 7, 10, 11, A		1, 2, 11		1, 5, 6, 7, 8		5, 9, 11
Transport Regime in Gas-Liquid-Solid Fluidization	Mode Designation	T-I-a-1	T-I-a-2	T-I-b	T-II-a	T-II-b	T-III-a	T-III-b		
	Schematic Diagram									
	Continuous Phase	Liquid			Gas			Liquid		
	Flow Direction	Cocurrent Up-Flow				Countercurrent Flow		Cocurrent Down-Flow		
	References (Chapters)	1, 6, 7, 8, 11		1, 4, 10, 11, A		1, 6		1, 9, 11		1, 9
(S-->) Independent Charge of Solids from Fluid (->S) Independent Discharge of Solids from Fluid (+S) Charge or Discharge of Solids with Fluid										

Figura 3.1 Clasificación básica de sistemas de fluidización.

3.3 Regímenes de Fluidización

Si el lecho sufre un incremento en el flujo ascendente del gas, el descenso de la presión aumenta conforme el flujo y esto provoca vibraciones entre las partículas.

Debido a que los lechos fluidizados se comportan de manera diferente dependiendo de la velocidad, las propiedades del gas y de las partículas, es necesario hacer un estudio más profundo de cómo este comportamiento afecta a las partículas.

Durante los procesos de fluidización se pueden encontrar diferentes regímenes de flujo, dichos regímenes dependen de la densidad y tamaño de la partícula, así como

de la presión del gas y la temperatura, la velocidad de fluidización, diámetro del tubo que conforma el lecho y profundidad del lecho.

Los regímenes más comunes son: fluidización suave, fluidización con burbujeo, turbulenta, con *slugging* axial plano y de fase diluida con transporte neumático. En la figura 3.2 se ilustra como se comportan el lecho en los diferentes regímenes de fluidización

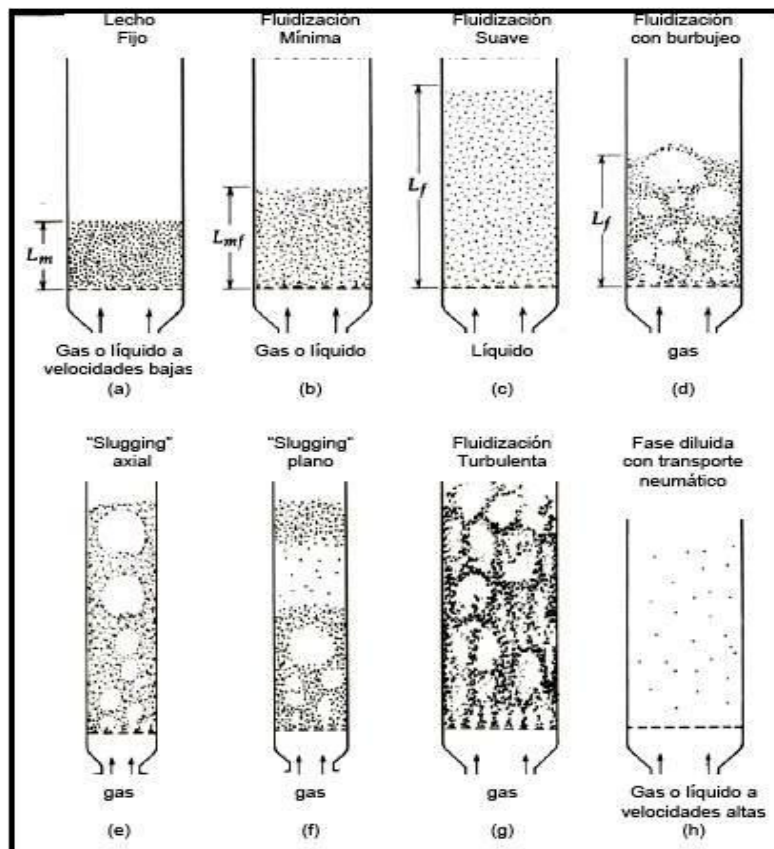


Figura 3.2 Comportamiento de los diferentes regímenes de fluidización.

3.4 Efecto del tamaño y densidad de la partícula

A principios de los años 70's Geldart (1973) publicó una clasificación de partículas según su densidad y tamaño, así como su comportamiento durante el proceso de fluidización, estas categorías son 4(Figura 3.3).

Grupo A: Estas partículas oscilan entre los rangos de 20 a 100 μ m presentando una densidad de partícula menor que 1400 kgm^{-3} . La expansión de estas partículas se da cuando la velocidad del fluidizado sobrepasa la velocidad mínima de fluidización del lecho es por dos o tres veces.

Grupo B: Este grupo contiene a la mayoría de los materiales de tamaño medio de 400 a 500 μ m y densidad de 1.4 a 4 g/cm^3 , un ejemplo típico de este grupo es la arena. Fluidizan bien con burbujeo vigoroso. Los lechos que contienen partículas de este tipo muestran una mucha menor estabilidad de expansión del lecho que las partículas de la categoría A. Un burbujeo libre sucede cuando se alcanza la velocidad mínima de fluidización.

Grupo C: Polvos muy finos y cohesivos, difíciles de fluidizar ya que las fuerzas entre partículas son mayores a las fuerzas logradas por el arrastre un ejemplo de este tipo de partículas es el talco y la harina.

Grupo D: Las partículas del grupo D presentan tamaños mayores a 600 μ m y su densidad también es muy elevada, un ejemplo de este tipo de partículas son los granos de café. Conforme el flujo de gas va pasando a través de los huecos que el lecho presenta éste tiene un comportamiento turbulento o transitivo en lugar de laminar.

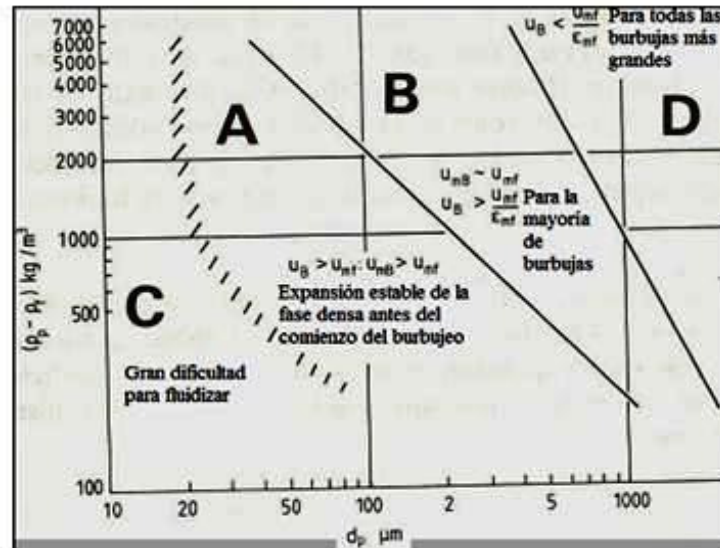


Figura 3.3 Diagrama de clasificación de partículas según Geldart (1973).

La densidad de la partícula se define mediante la siguiente fórmula:

$$\rho_p = \frac{\text{masa de una partícula (M)}}{\text{Volumen que la partícula debe desplazar si su superficie fuese no porosa (Vp)}} \quad (3.1)$$

Escrita de otra manera:

$$\rho_p = \frac{M}{V_p} \quad (3.2)$$

3.5 Parámetros importantes en un lecho fluidizado

Para entender mejor el comportamiento de un lecho fluidizado y poder hacer predicciones del mismo, es necesario considerar las variables que intervienen en el proceso de fluidización. De la misma manera es importante conocer los procesos

internos como son: la mezcla de las partículas sólidas entre sí, la transferencia de calor y masa, así como el transporte de partículas.

A continuación se explicaran las variables que influyen en el lecho fluidizado, algunas de estas variables son: la velocidad mínima de fluidización U_{mf} , la porosidad (ε), el número de Reynolds (Re) y la esfericidad (ϕ) de la partícula, diámetros promedio, entre otros.

3.5.1 Porosidad

Se llama porosidad al espacio libre que existe entre las partículas que se encuentra dentro del lecho, este espacio libre entre moléculas es afectado por el tamaño y la forma de la partícula., este parámetro es definido por medio de la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen hueco}}{\text{Volumen total}} = 1 - \frac{\text{Volumen del sólido}}{\text{Volumen del lecho}}$$

(3.3)

3.5.2 Esfericidad de la partícula

Debido a que las partículas que se introducen un lecho son irregulares, es decir no son completamente redondas, es necesario definir un parámetro que permita saber la forma real de la partícula. La manera más apropiada de conocer el grado de redondez de una partícula es la esfericidad, este concepto comprende la relación del área de una esfera con el área de la partícula ambas partículas con el mismo volumen:

$$\varphi = \frac{\text{Área superficial de una esfera con el mismo volumen que el de la partícula}}{\text{Área superficial de la partícula}} \quad (3.4)$$

Existen parámetros adicionales para poder definir la velocidad Williams et al. (1990), los más conocidos son:

d_s = (diámetro de superficie): El diámetro de una esfera teniendo la misma superficie como la partícula.

d_v = (volumen diámetro): El diámetro de una esfera con el mismo volumen que tiene la partícula.

d_{sv} = (superficie/volumen diámetro): El diámetro de una esfera teniendo la misma razón de superficie área/volumen que la partícula a estudiar.

d_t = (tamaño de tamiz): El ancho del mínimo apertura del cuadrado del tamiz por donde la partícula puede pasar.

El volumen de una partícula no esférica v_p , está dado por:

$$v_p = \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} \quad (3.5)$$

Donde d_p representa el diámetro de una esfera cuyo volumen es el mismo que el de la partícula. El área superficial de una partícula (a_p) está dada por:

$$a_p = \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} S_v \quad (3.6)$$

en donde S_v es el área superficial por unidad de volumen

Sustituyendo en la fórmula 3.4 se obtiene:

$$\varphi = \frac{6}{d_p S_v} \quad (3.7)$$

3.5.3 Diámetro de la partícula

El tamaño de la partícula es usualmente determinado por experimentación para obtener el peso fracción en cada rango de tamaño Pell M. (1990). El método mas utilizado en lo que se refiere a los lechos fluidizados es que relaciona la superficie volumen diámetro, d_{sv} , y el peso de una fracción de la partícula:

$$d_p = d_{sv} = \frac{1}{\sum x_i / d_{pi}} \quad (3.8)$$

Donde

d_p = Tamaño promedio de la partícula

x_i = Peso fracción de tamaño pantalla promedio d_{pi}

Este diámetro proporciona un peso mayor a partículas pequeñas y es el método de selección cuando la distribución del tamaño de la partícula esta involucrada.

3.6 Relación de presión y temperatura en un lecho fluidizado

Como resultado de diversos estudios enfocados a cómo la presión y la temperatura afectan el comportamiento de un lecho fluidizado se han obtenido resultados similares en partículas de polvo de carbón poroso, carbón y cristales de tamaño uniforme, algunas de las conclusiones a las que se han llegado son las siguientes:

Efectos de la presión (Davidson et al. 1985):

- La porosidad mínima de fluidización (ϵ_{mf}) aumenta ligeramente entre el 1 al 4 % con el aumento de la presión de operación.
- La velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) disminuye con el aumento de la presión de operación, siendo insignificante para lechos de partículas finas ($d_p \leq 100\text{mm}$) pero significativo para partículas grandes ($d_p \geq 100\text{mm}$).

Efectos de la temperatura (Davidson et al. 1985):

- La porosidad mínima de fluidización (ϵ_{mf}) aumenta con partículas pequeñas hasta un 8% para una temperatura máxima de 500° C, pero no se observa afectada para partículas grandes.
- La velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) se puede determinar muy fácilmente cuando se encuentra un valor correcto de ϵ_{mf} .

3.7 Velocidades relacionadas en un lecho fluidizado

En un lecho fluidizado se relacionan cuatro diferentes tipos de velocidades que se presentan en diferentes fases o tipos de lecho, éstas son las siguientes: velocidad superficial del gas U_o , velocidad mínima de fluidización U_{mf} , velocidad terminal U_t y la velocidad mínima de burbujeo U_{mb} .

3.7.1 Velocidad mínima de fluidización

Al principio del proceso de secado el lecho permanece inmóvil hasta el punto en que se las partículas empiezan a moverse imitando al gas que fluye, sin embargo existen algunos arreglos entre partículas mientras se va aproximando al estado de fluidización. Esta se presenta con el aumento del caudal en el lecho.

Se llega a un punto donde las partículas sólidas se encuentran en estado de suspensión causado por el flujo ascendente del gas, lo que provoca que la fuerza de compresión entre las partículas desaparezca haciendo que se muevan y se puedan levantar. La U_{mf} corresponde a una situación homogénea donde no se toman en cuenta las burbujas. Un método para la obtención de la velocidad mínima de fluidización se describe en la figura 3.2 en donde es necesario realizar una regresión lineal que se intersecte con una línea horizontal que pase por los puntos más altos de la curva, para conocer el valor de U_{mf} .

Cuando el gas fluye en dirección ascendente a través del lecho empaquetado sin ninguna restricción al nivel superior de la superficie, la caída de presión se incrementa con la velocidad del gas, hasta que la fricción en una partícula excede la fuerza de gravitación

Con la ecuación de Ergun (1952) se representa este cambio:

$$\frac{\Delta p}{H} = \frac{K\mu}{d_{sv}^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} U \quad (3.9)$$

En donde:

U: Velocidad superficial o de tubo a vacío [m/s]

d_{sv} : diámetro de partícula [m]

ε : porosidad del lecho [-]

μ : viscosidad [cP]

K: constante que depende de N_{Re} , ε , d_{sv} , etc.

El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\rho_g U d_{sv}}{\mu} \quad (3.10)$$

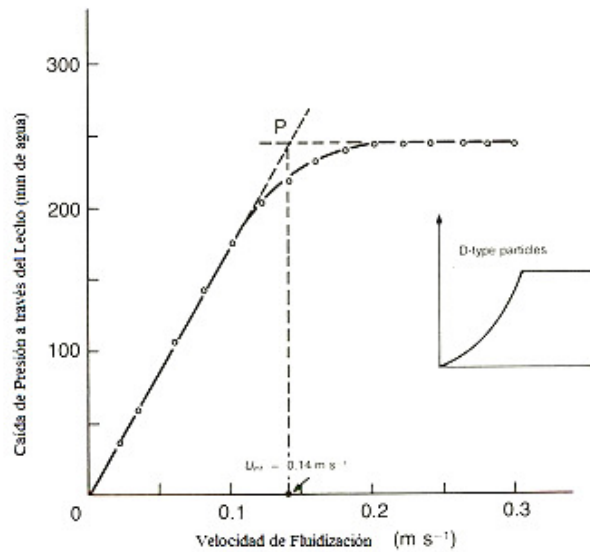


Figura 3.4 Caída de presión vs velocidad de fluidización. Ergun (1952)

Wen y Yu (1966) hicieron una correlación en la cual se involucran las constantes numéricas con los términos de porosidad usando el volumen del diámetro d_v en lugar de d_{sv} por lo que propusieron el número de Arquímedes:

$$Ar = 165 (Re_{mf} + 24.5 Re_{mf}^2) \quad (3.11)$$

El número de Arquímedes puede ser calculado también:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.12)$$

Años más tarde después de múltiples estudios realizados la propuesta de Wen y Yu fue reformulada, dando como resultado la siguiente ecuación Geldart (1986):

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_f d_v} \left\{ (1,135.7 + 0.0408 Ar)^{1/2} - 33.7 \right\} \quad (3.13)$$

La Ecuación 3.13 deberá ser usada para partículas más grandes que 100 μm , mientras que para partículas menores a los 100 μm la ecuación que permite obtener mejores resultados es:

$$U_{mf} = \frac{(\rho_p - \rho_g)^{0.934} g^{0.934} d_p^{1.8}}{1,111 \mu^{0.87} \rho_g^{0.066}} \quad (3.14)$$

Donde:

ρ_p : densidad de la partícula, [kg/m^3]

ρ_g : densidad del gas, [kg/m^3]

g : gravedad, [m/s^2]

d_p : diámetro de la partícula, [m]

μ : viscosidad, [cP]

3.7.2 Velocidad terminal de partículas

Se conoce como velocidad terminal cuando las partículas se alejan de la pared y su velocidad aumentar hasta que ésta se vuelve estable.

La velocidad final, conocida como velocidad terminal U_t , para la esfera de diámetro d_s está dada por:

$$(\rho_p - \rho_f) g \frac{\pi d_s^3}{6} = \frac{1}{2} \rho_f U_t^2 S C_D \quad (3.15)$$

En donde:

$$S: \text{Área frontal de la esfera} = \frac{\pi d_s^2}{4}, [\text{m}^2]$$

C_D : Coeficiente de arrastre (determinado experimentalmente), [-]

ρ_p : Densidad de la partícula, $[\text{kg}/\text{m}^3]$

ρ_f : Densidad del gas, $[\text{kg}/\text{m}^3]$

g : Fuerza de gravedad, $[\text{m}/\text{s}^2]$

Cabe mencionar que el coeficiente de arrastre C_D depende del número de Reynolds Re_p , para poder ver la relación existente entre el número de Reynolds y el coeficiente de arrastre, hay que conocer las siguientes ecuaciones y sus respectivas restricciones:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad \text{para } Re_p < 0.4 \quad (3.16)$$

y

$$C_D = \frac{10}{Re_p^{1/2}} \quad \text{para } 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.17)$$

Al sustituir estas dos ecuaciones en la ecuación 3.7 obtenemos que:

$$U_t = \frac{(\rho_p - \rho_f)gd_s^2}{18\mu_f} \quad \text{para } Re_p < 0.4 \quad (3.18)$$

y

$$U_t = \left(\frac{4(\rho_p - \rho_f)^2 g^2}{225\mu_f \rho_f} \right)^{1/3} d_s \quad \text{para } 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.19)$$

3.8 Sistemas de lechos fijos vs. sistemas fluidizados.

Las ventajas de los sistemas de lecho fluidizados sobre los lecho fijos son las macro mezclas que se presentan, así como las grandes dispersiones de fases y altas conversiones reactantes para reacciones cinéticas, favoreciendo así completamente la mezcla del modelo de flujo, capacidad de alcanzar una significativa uniformidad en las temperaturas sin ayuda de medios externos, facilidad en el suministro y eliminación de calor de ahí que haya un excelente control en la temperatura.

3.9 Burbujeo en lechos fluidizados

La creación de vacíos en los lechos fluidizados se les llama burbujas. Para poder hacer un estudio correcto del burbujeo en los lechos fluidizados, se deben distinguir la fase de burbuja y la fase de partículas siendo estas las partículas fluidizadas por un gas intersticial. Se presenta en el momento que la expansión deja de ser homogénea y aparece la primera burbuja.

La formación de burbujas es causante del movimiento de la fase de partículas el cual es el principal factor de mezclado en lechos burbujeantes. El movimiento de partículas es causante de la uniformidad térmica y altos niveles de transferencia de calor. La burbuja se considera como un hueco vacío sin ninguna partícula dentro. El desempeño del lecho fluidizado esta directamente relacionado cuando la burbuja emerge e intercambia gas con el gas de la fase densa.

La forma del cálculo de la velocidad es de una burbuja aislada que se comienza a suspender en un recipiente de diámetro grande para evitar que choque con las paredes de la columna, se define como:

$$U_b = 0.35\sqrt{g \cdot D_c} \quad (3.20)$$

En donde:

g: Fuerza de gravedad, [m/s²]

D_c: Diámetro del lecho contenido en el recipiente, [m]

3.10 Velocidad mínima de burbujeo

Al igual que en los lechos fluidizados se presenta la velocidad mínima de fluidización, las burbujas también presentan una velocidad mínima de burbujeo la cual es la velocidad a la cual las burbujas aparecen y desaparecen, antes de que se presente la velocidad mínima de burbujeo es posible obtener una expansión sin burbujeo. Geldart (1986) realizó un trabajo experimental y propuso la relación siguiente:

$$U_{mb} = K_{mb} d_s \quad (3.21)$$

Donde:

d_s = Diámetro promedio, [cm]

K_{mb} = Valor es de 100, cuando el gas se encuentra a temperatura ambiente

Se necesita otra ecuación para partículas finas (<100μm) esto para obtener valores de

U_{mf} menores que U_{mb}

$$U_{mb} = 2.07^{0.716F} \frac{\bar{d}_s \rho_g^{0.06}}{\mu^{0.347}}$$

$$(3.22)$$

En donde:

F: fracción de fino (partículas menores a $45\mu\text{m}$)

U_{mb} : Velocidad mínima de burbujeo, [m/s]

\bar{d}_s = : diámetro promedio de la partícula, [cm]

ρ_g : densidad del gas, [kg/m^3]

μ : viscosidad, [cP]

3.11 Aplicación de sistemas fluidizados.

Existen numerosas aplicaciones de los sistemas fluidizados, los cuales pueden ser a pequeña escala o para su uso comercial. En este tipo de aplicaciones las fases individuales pueden ser reactantes, catalíticos o inertes (Shah, 1979; L'Homme, 1979). Existen muchos tipos de aplicaciones en las diferentes áreas de la industria dependiendo del modo en que se encuentren.

3.12 Descripción de sistema fluidizado.

Para llevar a cabo la fluidización, existen algunos parámetros que son importantes como pueden ser los componentes del sistema, la velocidad de la fluidización, entre otros, los cuales serán descritos a continuación.

3.13 Expansión del lecho

El hecho de que existan burbujas dentro de un lecho, ocasiona que el volumen del mismo varíe dependiendo del tamaño de la burbuja, así como por la manera en que ésta se distribuye. Una forma de comprender la manera en que la burbuja afecta el volumen del lecho, es analizando una sección del lecho en el que exista un flujo visible de burbujas Q_b (m^3/s) y se conozca la velocidad promedio de las burbujas U_a , (m/s) una vez obtenidos estos parámetros es posible encontrar la fracción promedio del lecho que es ocupada por burbujas:

$$\varepsilon_b = \frac{Q_b}{AU_a} \quad (3.23)$$

En la cual A es el área transversal del lecho [m^2].

La estimación para Q_b se basa en la teoría de fluidización de las dos fases que consiste en:

- La existencia de una fase cuya velocidad de flujo es igual a la velocidad incipiente de fluidización.
- Una fase de burbuja, la cual se ve afectada por el fluido fluidizado.

La teoría de las dos fases es útil para explicar la expansión del lecho mediante la velocidad superficial del gas. El flujo de masa del gas en la fase burbujeante del lecho se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_g A \beta U_b = \rho_g A (U_o - U_{mf}) \quad (3.24)$$

Donde

ρ_g : densidad del gas, [kg/m³]

A: area de la sección transversal, [m²]

β : fracción vacía de la burbuja, [-]

U_b : velocidad absoluta de la burbuja

U_o : Velocidad superficial del gas

U_{mf} : velocidad mínima de fluidización

La fracción vacía de la burbuja se define como:

$$\beta = \frac{L - L_{mf}}{L}$$

(3.25)

Donde:

L: altura del lecho, [m]

L_{mf} : altura del lecho a la velocidad mínima de fluidización, [m]

Sustituyendo la ecuación 3.25 en la 3.24 se obtiene:

$$\frac{L - L_{mf}}{L} = \frac{U_o - U_{mf}}{U_b}$$

(3.26)

3.14 Componentes del sistema

El lecho fluidizado depende mucho del tipo de fluidización que se este realizando y la aplicación que se le quiera dar; pero existen algunos componentes que son comunes en todos las aplicaciones. (Figura 3.5)

- a) **Columna de fluidización:** Es un tubo en el cual, como respuesta al movimiento y velocidad del fluido, las partículas se mueven hasta quedarse suspendidas.
- b) **Sección uniformadora:** Es un cono difusor utilizado para obtener el perfil de velocidad deseado.
- c) **Distribuidor:** Se trata de una placa con perforaciones; su diseño es muy importante, ya que afecta de manera directa la calidad de la fluidización.
- d) **Sistema de suministro de fluido:** Es un conjunto de válvulas reguladoras e instrumentos medidores de flujo y otros dispositivos con el objeto de crear las condiciones termodinámicas requeridas para el fluido.
- e) **Sistema de medición de presión.**
- f) **Sistema de medición de temperatura.**

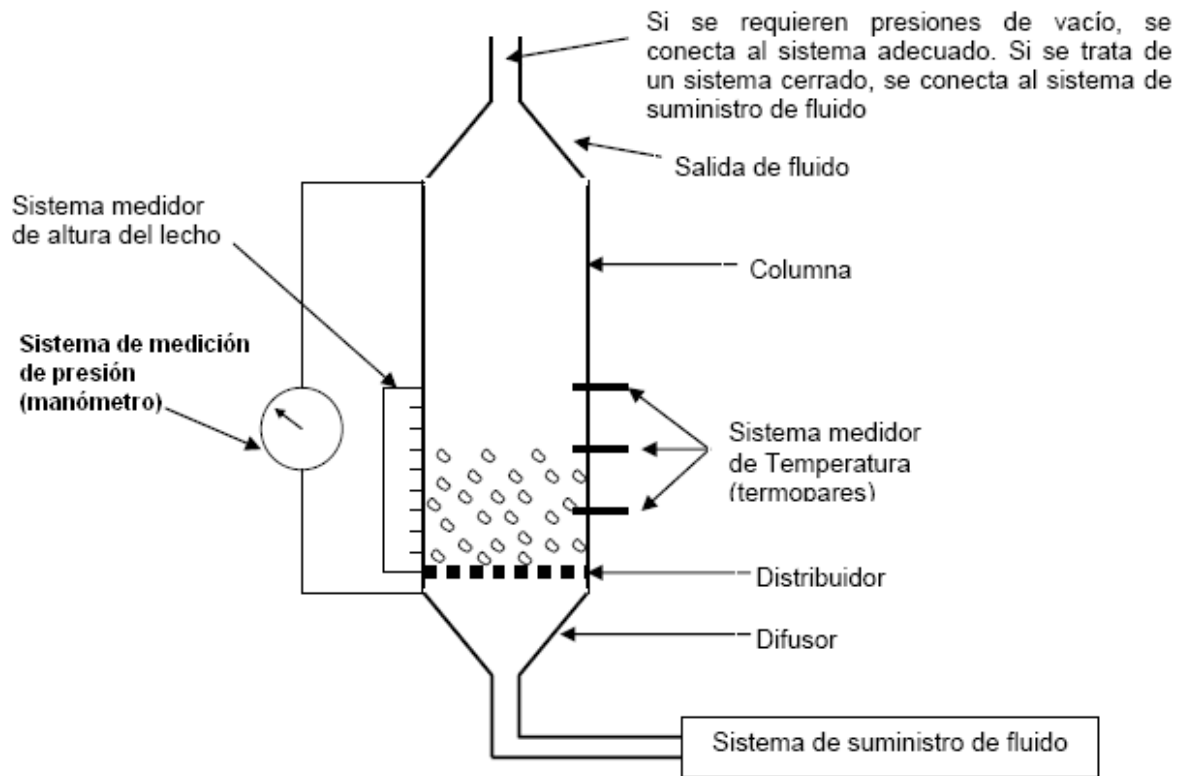


Figura 3.5 Principales componentes, así como las variables importantes.