

## **CAPÍTULO 2**

# **FLUIDODINÁMICA DE LECHO FLUIDIZADO**

### **2.1. Introducción**

En el presente capítulo se exponen los fundamentos básicos de la fluidización, se presta especial atención al trasiego de sólidos en un lecho fluido. Además se expone en un último apartado las nociones básicas del escalado a un modelo de menores dimensiones de dichos lechos, con el fin de que las características hidrodinámicas en el lecho de referencia y en el escalado sean equivalentes.

La fluidización se define como un proceso en el que, en un lecho con partículas sólidas, se hace pasar un fluido hasta lograr una mezcla homogénea entre las partículas y el fluido.

La fluidez de un líquido tiene su origen en la movilidad de las partículas que lo constituyen. En un lecho fluido se pretende separar las partículas de un sólido suficientemente para que alcancen dicha movilidad, para ello se recurre a un flujo

constante de un líquido o un gas a una velocidad suficiente (igual o superior a la velocidad de mínima fluidización de las partículas sólidas. La pérdida de carga provocada por un lecho de partículas aumenta conforme la velocidad del fluido se incrementa, llegando un momento en que se iguala al peso de las partículas que comienzan a separarse unas de otras, se dice entonces que están flotando hidrodinámicamente, o en estado fluidizado. Si se aumenta la velocidad del fluido por encima de la velocidad de mínima fluidización de las partículas que conforman el lecho, se obtiene como resultado que el espacio entre dichas partículas se haga aún mayor, con la consiguiente expansión del lecho, pero la diferencia de presión en el lecho no se ve afectada. Por tanto, a velocidades superiores a la velocidad de mínima fluidización, el gas fluye en forma de burbujas a través del lecho de partículas, ya que será así se ofrece menos resistencia al paso del gas por el lecho. El movimiento de burbujas hace de agitador lo que da lugar a mezclas sólidas rápidas, a un buen contacto entre partículas y gas, y a la uniformidad axial en temperatura y composición.

Estas propiedades hacen que los lechos sean útiles para operaciones, tales como reacción química, intercambio de calor o transferencia de masa. Así, entre sus principales aplicaciones se incluyen, la combustión y gasificación del carbón, la síntesis catalítica (Frischer Tropsch), el secado de sólidos, etc.

## **2.2 Características Básicas de Fluidización**

### **- Velocidad mínima de fluidización**

La velocidad mínima de fluidización de un lecho es una propiedad de la partícula que lo conforma. En concreto esta velocidad depende de su forma, densidad y tamaño. Para calcularla podemos recurrir a métodos gráficos o matemáticos, que consiste en la igualdad de la ecuación de Ergún (para un lecho fijo de partículas) y la ecuación que me determina la pérdida de carga en un lecho fluidizado. La igualdad de las ecuaciones nos da el cambio de presión, donde, la primera es para lecho fijo y la

segunda es para el lecho fluidizado y por lo tanto, el punto de intersección de ambas me marca la  $u_{mf}$  para el lecho.

La ecuación de Ergún se expresa de forma simple como función de los números de  $Re_{mf}$  y  $Ar$  (D. Kunii, O. Levenspiel. *Fluidización Engineering*, 1968).

$$\varepsilon_{mf}^3 + \frac{150 \cdot Re_{mf}}{\phi^2 \cdot Ar} \cdot \varepsilon_{mf} - \frac{150 \cdot Re_{mf} + 1,75 \cdot Re_{mf}^2 \cdot \phi}{\phi^2 \cdot Ar} = 0 \quad [1]$$

Donde los números de  $Re_{mf}$  y  $Ar$  se pueden expresar de la siguiente forma,

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_{g(T)} \cdot (\rho_s - \rho_{g(T)}) \cdot g}{\mu_{g(T)}^2} \quad [2]$$

$$Re_{mf} = \sqrt{27,2^2 + 0,0408 \cdot Ar} - 27,2 \quad [3]$$

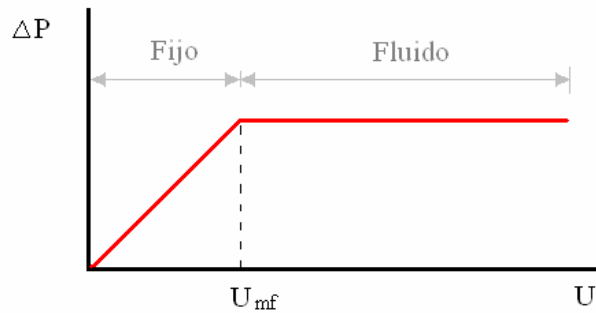
Entonces, a partir de  $Re_{mf}$  y  $Ar$  la velocidad de mínima fluidización se puede expresar como:

$$u_{mf} = \frac{Re_{mf} \cdot \mu_{g(T)}}{d_p \cdot \rho_g} \quad [4]$$

Por otro lado la pérdida de carga en lecho fluidizado se puede expresar como:

$$\frac{dP}{dz} = (\rho_s - \rho_g) \cdot g \cdot (1 - \varepsilon) \quad [5]$$

La igualdad de las ecuaciones nos da el cambio de presión, donde, la primera es para lecho fijo y la segunda es para el lecho fluidizado y, por lo tanto, el punto de intersección de ambas indica el valor de la  $u_{mf}$  para el lecho, como podemos ver en la siguiente figura:



**Figura 2.1: Representación velocidad de mínima fluidización en curva  $\Delta P$  - velocidad**

- **Porosidad de un lecho**

La porosidad de un lecho fluidizado viene representada por la relación de espacio libre entre partículas. Para determinar se suele recurrir a datos experimentales, y se calcula de manera global de la siguiente manera:

$$\varepsilon_l = \frac{V_{\text{hueco}}}{V_{\text{total}}} = 1 - \frac{V_{\text{sólido}}}{V_{\text{lecho}}} \quad [6]$$

Por otro lado, el valor de la porosidad del lecho fluido se puede calcular, una vez conocida la densidad del sólido utilizado y de la suspensión sólido-gas que conforma el lecho de partículas, a partir de la siguiente ecuación:

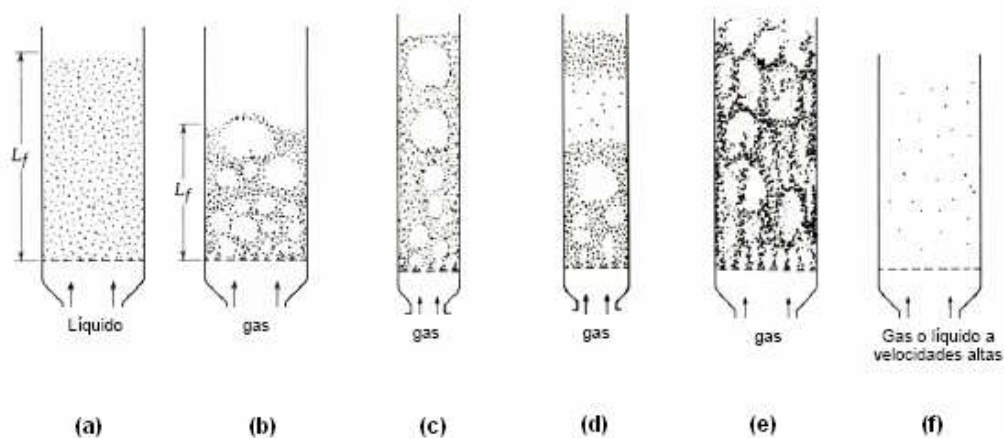
$$\rho_{\text{susp}} = \rho_s \cdot (1 - \varepsilon) \quad [7]$$

- **Regímenes de fluidización**

Una vez fluidizados, los lechos de partículas también pueden ser operados según diferentes regímenes de flujo, en función del tamaño de partícula y densidad, presión y temperatura del gas, velocidad de fluidización, profundidad del lecho, diámetro del lecho y construcción del plato distribuidor para alimentar el fluido.

Por tanto, es importante, una vez que se tiene el lecho fluidizado, reconocer de qué tipo se trata. Los regímenes de flujo más comunes son:

- a) **Fluidización suave:** sólo se da cuando el fluido alimentado es un líquido, a una velocidad baja, algo superior a la de mínima fluidización, se produce un lecho expandido de gran longitud y sin burbujas, lo que provoca que sea muy homogéneo.
- b) **Fluidización con burbujeo:** se observa burbujeo cuando se tiene una mayor velocidad del gas, y éste a la hora de atravesar el lecho de partículas, lo hace en forma de burbujas, para que así la resistencia a su paso sea la mínima posible.
- c) **Fluidización turbulenta:** se produce cuando tenemos un paso brusco de las ya mencionadas burbujas a través del lecho de partículas sólidas. El principal motivo para que se dé el régimen turbulento es una elevada velocidad del fluido de aporte al lecho.
- d) y e) **Fluidización con “slugging” axial y plano:** Cuando unas burbujas van subiendo a través de una columna usualmente se unen y puede llegar cierto momento en que la burbuja formada sea tan grande como para ocupar toda la sección transversal. Con esto, las pequeñas partículas fluyen hacia abajo por la pared, alrededor del hueco formado por el gas. Esto es lo que se llama *slugging* axial. Con partículas gruesas esto no es posible y entonces la burbuja empuja la porción del lecho arriba. Ellas bajan sólo cuando se desintegra, y luego puede formarse otro, repitiéndose el ciclo. Esto se conoce como *slugging* plano.
- f) **Fluidización de fase diluida con transporte neumático:** se da cuando la velocidad del gas de fluidización está por encima de la velocidad de arrastre de sólido y así se produce el arrastre del mismo.



**Figura 2.2: Regímenes de Fluidización**

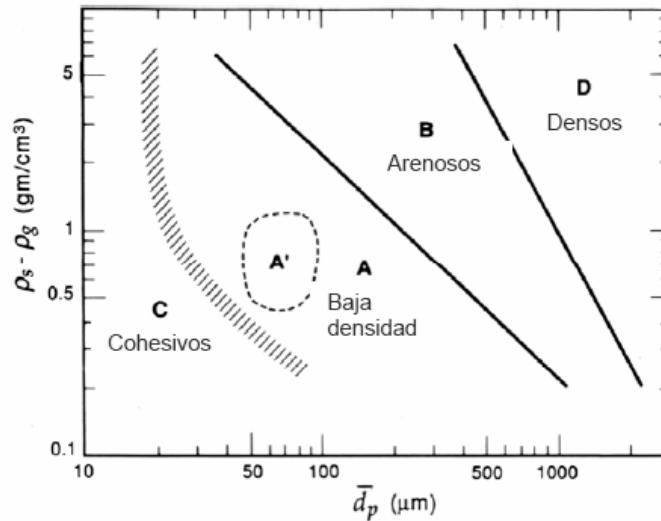
- **Clasificación de las partículas**

Las propiedades de las partículas tienen una gran influencia en la velocidad mínima de fluidización, pero también en otros factores. Es importante agrupar ciertas clases de partículas para las cuales su comportamiento en el lecho fluidizado sea similar. Así será posible extrapolar los resultados obtenidos con un tipo de partícula a otras partículas con características similares. Por tanto, mediante experiencias en lechos fluidizados con distintos tipos de sólidos se ha observado la fluidización de las diferentes partículas, creando dichas clasificaciones de las partículas, siendo la de Geldart una de las más utilizadas. Geldart logró una clasificación, donde podemos encontrar los siguientes grupos, de menor a mayor tamaño de partícula.

- a) **Grupo C:** se trata de polvos muy finos o cohesivos. Son difíciles de fluidizar debido a que las fuerzas entre partículas son más importantes que las logradas por el arrastre. El talco y la harina son buenos ejemplos.
- b) **Grupo A:** materiales que tienen un tamaño medio pequeño o una baja densidad ( $<1.4 \text{ g/cm}^3$ ). Se fluidizan fácilmente.
- c) **Grupo B:** parecidos a la arena, o partículas con diámetro medio de 40 a 500  $\mu\text{m}$  y densidad de 1.4 a 4  $\text{g/cm}^3$ . Fluidizan bien con un burbujeo vigoroso.

- d) **Grupo D:** partículas grandes y/o densas. Lechos profundos son difíciles de fluidizar. Algunos ejemplos son los guisantes y los granos de café.

Esta clasificación se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 2.3: Clasificación de Geldart para las partículas sólidas**

### 2.3 Medidas Experimentales de Fluidización

En lechos fluidos gaseosos se pueden realizar diversas medidas, entre las que se encuentran la medida de la velocidad del sólido, del flujo másico, de la concentración volumétrica del mismo, así como su distribución vertical y horizontal dentro del sistema. Otras medidas que se pueden realizar se centran en la temperatura del sistema, la distribución lateral del gas de fluidización y la concentración del mismo en el equipo.

Estas medidas son importantes a escala industrial, ya que tienen influencia sobre los procesos de optimización, además de facilitar el análisis de los problemas que surgen en una planta, facilitando así, el seguimiento del funcionamiento del sistema.

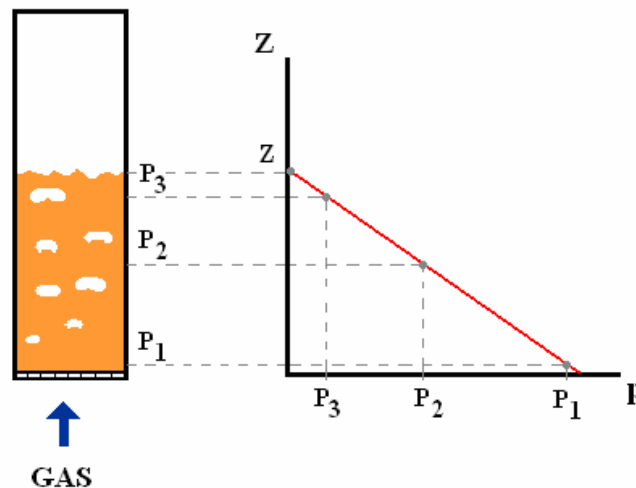
A continuación se describen las técnicas utilizadas para la medida más típica en un lecho fluido, como es la medida de presión.

Para ello, se conoce que en un lecho fluido las partículas sólidas se sustentan en estado de suspensión gracias a un flujo de gas ascendente. Entonces, la pérdida de carga será aproximadamente igual al peso de los sólidos menos su flotabilidad por unidad de sección transversal de área del lecho (J. Werther, 1998).

$$dP = (\rho_s - \rho_f) \cdot c_v \cdot g \cdot dz \quad [8]$$

Donde,  $c_v$  es la concentración volumétrica del sólido en un elemento de volumen  $A_t \cdot \Delta h$  en el lecho. Según la ecuación [5] antes descrita  $c_v$  se puede equiparar a  $(1 - \varepsilon)$ .

En un lecho fluido burbujeante el valor de  $dP/dz$  es prácticamente constante, lo cual nos indica que existe una relación lineal entre la presión y la altura en el lecho, como se ve en la figura. Entonces se deduce que el valor de  $c_v$  también es constante.



**Figura 2.4: Altura – Presión en lecho fluido**

Así, con unas pocas medidas de presión a varias alturas (Z) permiten determinar la altura del lecho fluidizado, mediante la extrapolación del perfil de presiones, como se indica en la figura.

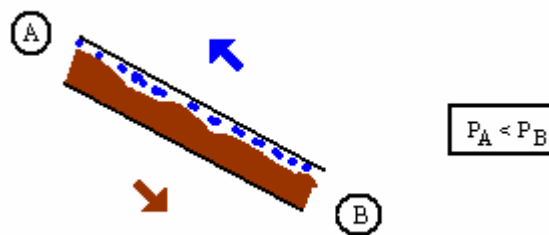


## 2.4 Standpipes y sistemas de retorno de sólidos

### - Standpipes

Un standpipe es básicamente una tubería de una determinada longitud por la cual tenemos flujo de sólidos. Estos sólidos pueden fluir a través del standpipe en fase densa o diluida. Podemos encontrar standpipes en posición vertical, o con un cierto ángulo respecto a la horizontal, e incluso pueden aparecer sistemas mixtos con parte del standpipes vertical y parte en ángulo.

Su propósito es transferir sólidos de una región de menor presión a otra de mayor presión. El sólido puede ser transferido en sentido descendente por gravedad en contra de un gradiente de presión adverso, si existe un flujo de gas relativo en sentido ascendente por el standpipe.



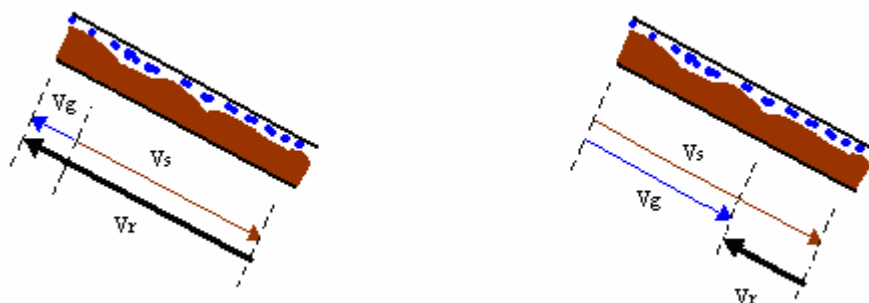
*Figura 2.5: Flujo relativo gas sólido en standpipe*

Este flujo de gas relativo, viene definido por la velocidad relativa del mismo, que se define por:

$$v_r = |v_s - v_g| \Rightarrow \begin{cases} v_s = \text{velocidad del sólido} \\ v_g = \text{velocidad del gas intersticial} = \frac{U}{\varepsilon} \end{cases}$$

Por tanto, el sólido en el standpipe circula en sentido descendente, sin embargo, el gas puede tomar cualquiera de los 2 caminos posibles, ascendente o descendente, según el reparto de presiones en el sistema, sin embargo, se debe tener en cuenta que

para que exista movimiento de sólidos debe existir una velocidad relativa del gas ascendente respecto de la del sólido, como podemos observar a continuación.

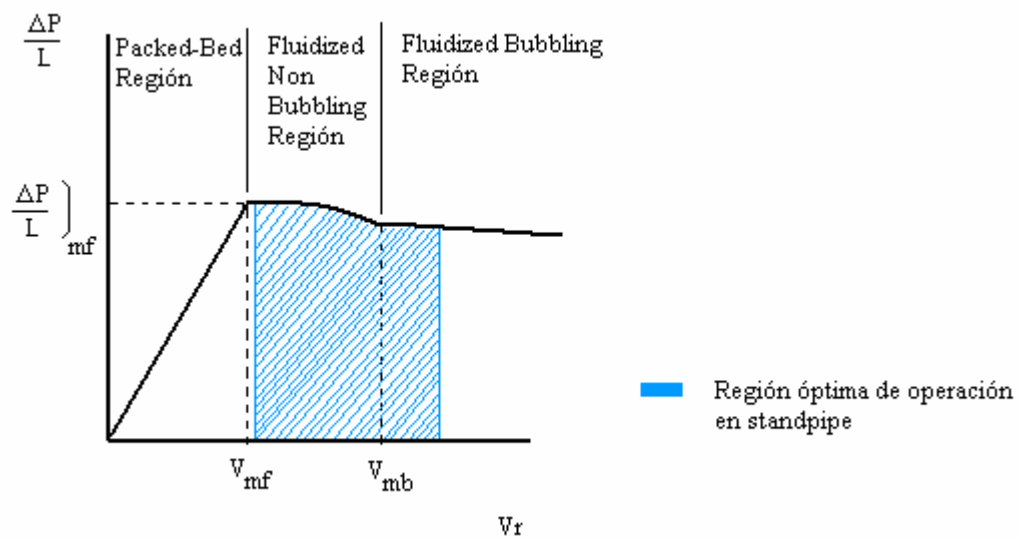


**Fig. 2.6 (A): Velocidad de Gas Ascendente**      **Fig 2.6 (B): Velocidad de Gas Descendente**

Generalmente un standpipes puede operar en 3 regimenes básicos de flujo, como son:

- **Packed-bed flow** (*paquetes de lecho*): se caracterizan por tener una  $v_r$  menor que la  $v_{mf}$ , y cuenta con una porosidad en el standpipe más o menos constante. Cuando se opera con este régimen al ir aumentando la  $v_r$  del gas respecto al sólido aumentará la pérdida de carga por unidad de longitud que provoca el sistema y se produce el desplazamiento de pulsos de paquetes de sólidos, que provocan vibraciones en el standpipe. Se debe evitar que se produzca este régimen, pero actualmente no existen métodos para predecir cuando se presentará.
  
- **Fluidized-bed flow** (*lecho fluido*): se trata de un flujo que aparece cuando se cuenta con una  $v_r$  similar o algo superior a la  $v_{mf}$ , por tanto, la porosidad en el standpipe variará a lo largo de la longitud del mismo. Al operar en este régimen la pérdida de carga por unidad de longitud se mantendrá constante aunque aumente la  $v_r$ . Dentro de este régimen el sistema puede presentar 2 tipos de comportamientos distintos:
  - Flujo con lecho fluido burbujeante.
  - Flujo con lecho fluido no burbujeante.

El tipo de sólidos con los que opere el sistema (Clasificación Geldart) será determinante para que tengamos un determinado flujo u otro. Así, si se trabaja en el standpipe con sólidos de tipo A ( $< d_p$ ) siempre va a existir una región donde se opere con régimen burbujeante, en concreto a velocidades superiores a  $v_{mb}$ , cuando se desarrollan velocidades comprendidas entre  $v_{mf}$  y  $v_{mb}$ , es decir, antes de la formación de dichas burbujas, el régimen será fluido pero sin burbujas. Por tanto el rango óptimo para operar con sólidos del tipo A será desde una  $v_r$  ligeramente superior a la  $v_{mf}$  hasta una velocidad que se encuentre por encima de la  $v_{mb}$ . Todos estos aspectos se pueden observar en la siguiente figura, donde se presenta la curva de fluidización de un determinado material en función de la pérdida de carga por unidad de longitud y la velocidad relativa.



**Figura 2.7: Regiones de Flujo y zonas óptimas de operación para sólidos tipo A**

En cambio, al trabajar en el standpipe con sólidos del tipo B ( $> d_p$ ), existen 2 posibles situaciones, ya que por debajo de la velocidad de mínima fluidización el movimiento de los sólidos será según paquetes de lecho (packed bed), y por encima de dicha velocidad tendremos un lecho fluido. Por otro lado, la velocidad óptima de operación se mantendrá levemente por encima de  $v_{mf}$ , como podemos ver en la siguiente figura.

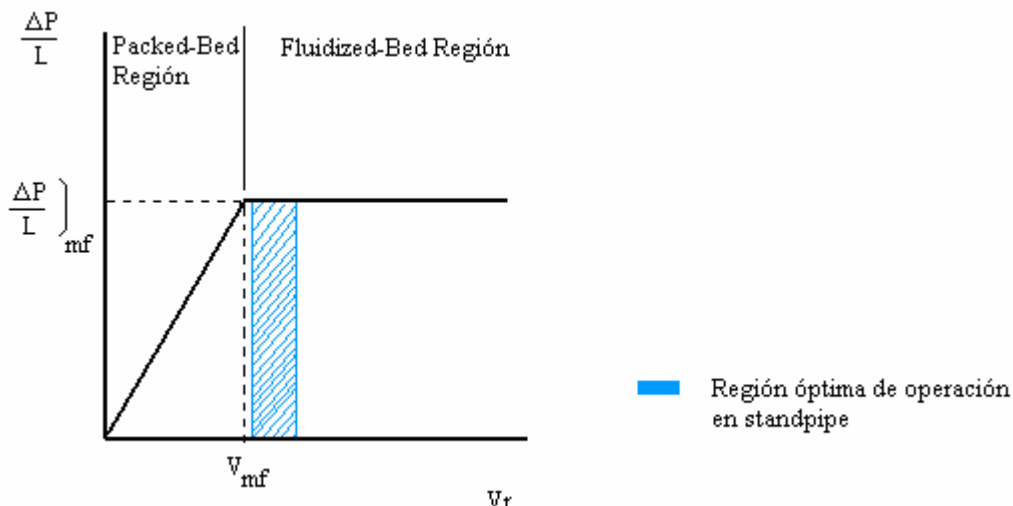


Figura 2.8: Regiones de Flujo y zonas óptimas de operación para sólidos tipo B

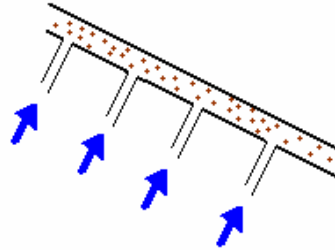
- **Streaming flow** (*lecho fluyente*): Esta región se caracteriza por las elevadas porosidades que se alcanzan en el lecho, así podemos pasar gran cantidad de gas a través del standpipe.

En muchos casos no es deseable tener un gran flujo de gas junto con los sólidos, ya que si tenemos un importante transporte de gas a través de los sólidos del standpipe, la pérdida de carga a través del mismo se verá aumentada o se reduce el flujo de sólidos. Por tanto, para reducir el flujo de gas a través del standpipe existen varias alternativas como son:

- Sumergir mas en el lecho la boca de descarga del standpipe, así aumentamos la pérdida de carga por unidad de longitud.
- Aumentamos el diámetro del standpipe, para disminuir el flujo másico de sólidos, así se consigue disminuir el flujo de gas y tener una fase más densa en el tubo.
- Disminuir la longitud del standpipe, con el fin de aumentar la pérdida de carga.

El principal problema de este sistema es el arranque de la operación, ya que cuando el standpipe se encuentra relleno de sólido, se deben vencer grandes fuerzas de fricción para que comience en trasiego del mismo. Una posible solución para mantener el movimiento del sólido en el standpipe en condiciones fluidas, es la aireación del mismo. Generalmente, es mejor colocar varios

puntos de inyección de aire en el standpipe en lugar de un único punto de aireación, para conseguir la distribución uniforme del gas, evitando la formación de grandes burbujas y la defluidización en el standpipe. Esto es especialmente importante al tener sólidos del tipo A fluyendo en el standpipe.

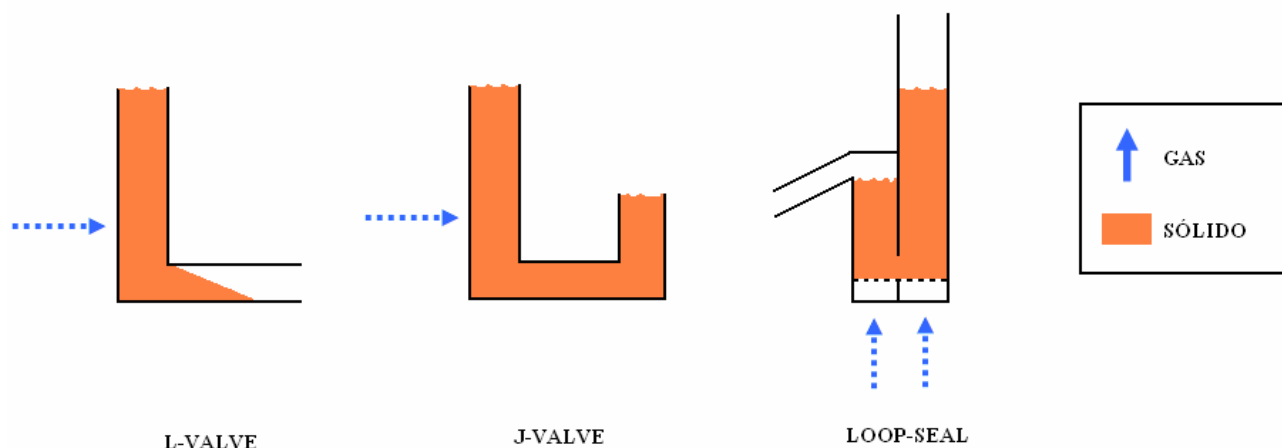


*Figura 2.9: Standpipe con Aireación Uniforme*

- Válvulas no mecánicas

A continuación se pasa a la descripción de las válvulas no mecánicas como sistema de retorno de sólidos, en sistemas donde se produce la circulación de los mismos.

En general, existen 2 tipos de válvulas para sistemas de reciclo de sólido: Uno se trata de válvulas mecánicas y el otro de válvulas no mecánicas. Entre las válvulas mecánicas típicas se encuentran las rotativas, de bola, de mariposa y de asiento. Este tipo de válvulas se caracteriza por el movimiento de alguna de sus partes para realizar el control del flujo de sólido, pero existe el inconveniente que rara vez se van a poder utilizar bajo condiciones de alta temperatura o presión, dando lugar a graves problemas de sellado. Por tanto, para aplicaciones en esas condiciones, se utilizan las válvulas no mecánicas, entre las que podemos encontrar, válvulas tipo L, J y loop-seal (ver figura), las cuales se caracterizan por la ausencia de movimiento de sus partes, su robustez y fácil construcción. Se trata de válvulas no mecánicas, sin movimiento de sus partes constructivas, donde se consigue el traspaso continuo de sólido desde una zona de baja presión a otra de alta presión.



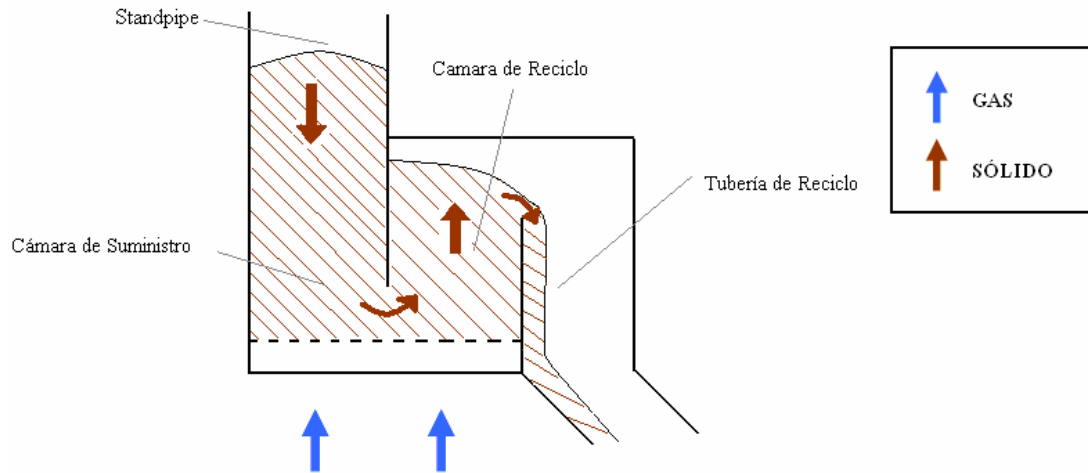
**Figura 2.10: Válvulas no mecánicas**

De las válvulas no mecánicas, el loop-seal es el más usado de ellas, siendo un componente crítico dentro de las calderas CFB. La misión del loop-seal, es llevar a cabo el trasiego de sólido de una cámara a otra cuya presión es mayor, es decir, se produce el paso de menor a mayor presión. Otro de los motivos para el uso de este tipo de válvulas es el efecto de sellado de gas, debido a la pérdida de carga que provoca la columna de sólido.

El loop-seal suele contar con 2 cámaras:

- Cámara de Suministro: Suele estar conectada directamente al standpipe o en algunos casos a la sección justo al fondo del mismo, esta cámara es la que proporciona sólidos a la siguiente, a partir de pared vertical que sirve de separación entre ambas.
- Cámara de Reciclo: el sólido que llega a esta cámara pasa a través de un rebosadero a la tubería de salida del sistema (tubería de reciclo).

Se aporta gas a dichas cámaras por su parte inferior, provocando la fluidización del material sólido que contiene el loop-seal, de modo que los sólidos se comportarán como un líquido, entonces una vez que alcanzan el rebosadero, caen por gravedad por la tubería o directamente a otro lecho.



*Figura 2.11: Esquema general del funcionamiento de un loop-seal*

## 2.5 Cálculo de Loop de Presiones en CFB

Para describir el loop de presiones de un sistema donde existe circulación de sólidos recurrimos a un lecho fluido circulante, que consta de:

- a) **Riser:** lecho principal.
- b) **Ciclón:** para captar las partículas.
- c) **Standpipe:** tubo de bajada que aporta sólido al loop-seal.
- d) **Loop-seal:** válvula no mecánica, que dosifica el retorno de sólidos al riser.

Al operar en calderas con lechos fluidos circulantes (CFB), se produce la circulación de las partículas sólidas a través de un loop, inyectando aire a gran velocidad en el equipo (fondo del riser). Los sólidos que salen por lo alto del riser son separados mediante un ciclón. Entonces el gas sale al exterior por la parte superior del ciclón mientras que el sólido cae al standpipe para ser recirculado al riser mediante una válvula no mecánica.

Un típico sistema de CFB se muestra en la figura:

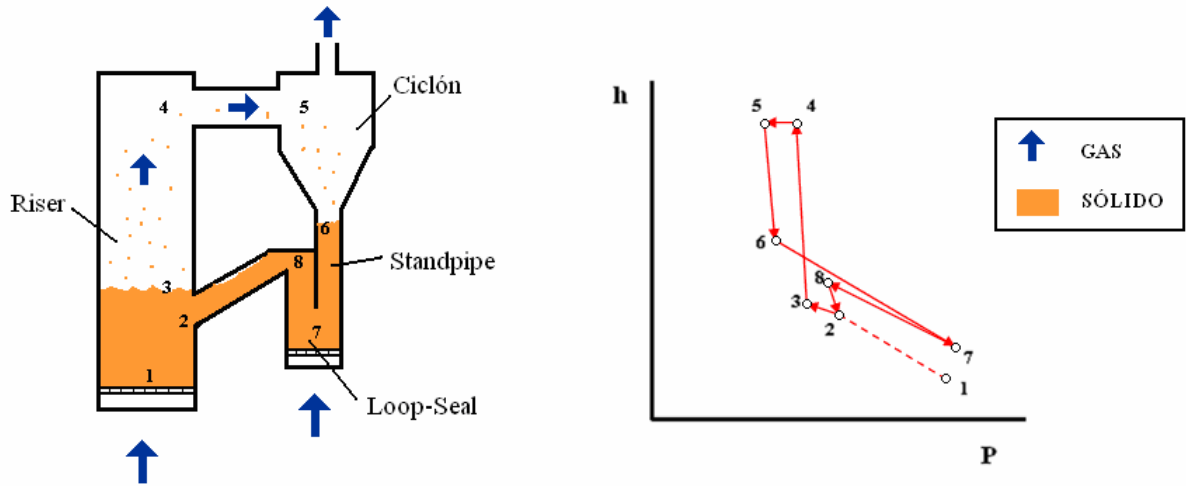


Figura 2.12: Sistema de circulación de sólidos y loop de presiones del mismo

En la figura se observa que el punto de mayor presión en el loop de circulación de sólidos, se encuentra en el fondo del loop-seal (7) o en el fondo del reactor (1), según el sistema estudiado, y la mínima presión del sistema se localiza en el ciclón (5).

Para realizar un balance de presiones en el loop, se consideran distintas secciones: 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-2. En cada sección se supone una densidad volumétrica de la mezcla gas-sólido ( $\bar{\rho}$ ), y se producirán unas determinadas pérdidas, asociada al movimiento del sólido y el gas, principalmente por fricción ( $\Delta\zeta > 0$ ).

Entonces un balance de energía mecánica para cada sección será:

$$(2-3) \quad P_3 - P_2 + \bar{\rho}_{2,3} \cdot g \cdot (h_3 - h_2) + \Delta\zeta_{2,3} = 0$$

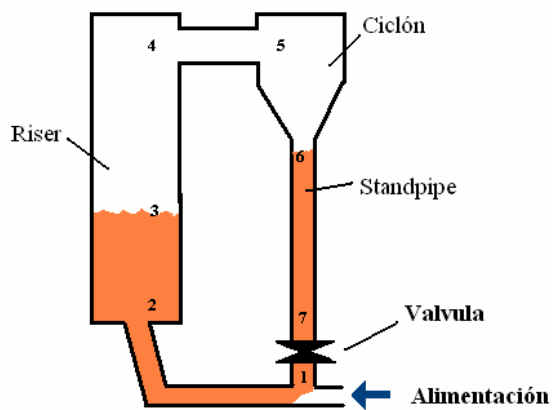
Para el resto de las secciones se sigue el mismo procedimiento, y así la última de las secciones consideradas será:

$$(8-2) \quad P_2 - P_8 + \bar{\rho}_{8,2} \cdot g \cdot (h_8 - h_2) + \Delta\zeta_{8,2} = 0$$

Por tanto para determinar todas las presiones en las diferentes zonas del loop el loop (expuestas anteriormente en el dibujo), será necesario conocer la  $\bar{\rho}$ , la cual, es diferente en cada zona del sistema.



Una posible modificación del esquema anterior es la inclusión de una válvula mecánica, en lugar del loop-seal, para el transporte de sólidos. La válvula realiza la misma función de sellado de gas que el loop-seal, impidiendo el paso del mismo desde 1 a 7 (ver dibujo), pero tiene el inconveniente de que las válvulas mecánicas no son muy eficaces para los sistemas con sólidos. En este caso la pérdida de carga provocada por la válvula ( $\Delta P_v$ ) debe ser incluida en el balance.



$$P_1 - P_7 + \bar{\rho}_{7,1} \cdot g \cdot (h_7 - h_1) + \Delta P_v = 0$$

Figura 2.13: Sistema de circulación de sólidos regulado con válvula mecánica

## 2.6 Escalado

### 2.6.1 Adimensionalización

Para el escalado de una planta industrial a otro sistema de menores dimensiones utilizamos el análisis adimensional.

Las cantidades adimensionales son universales, de tal forma que cualquier relación que involucre cantidades adimensionales es independiente del tamaño o escala del sistema. Consecuentemente, la información obtenida de un modelo o pequeño sistema que es representado así puede ser aplicada o utilizada directamente en sistemas similares de cualquier tamaño (por similitud geométrica o dinámica). Esto permite trasladar la información recogida de modelos de laboratorio a equipos a gran escala o a operaciones de planta. Por otro lado, La manera en que un sistema depende de

diferentes variables separadas que lo influyen, puede ser presentada en forma mucho más simple y más general en términos de las variables adimensionales. Así, el conjunto original de variables (dimensionales) se ve reemplazado por un conjunto equivalente, más pequeño, de variables adimensionales.

Para el caso particular de un lecho fluido, en el caso de mantener la tasa de mezcla G-S constante entre lechos de distinto tamaño, se obtienen características térmicas y velocidades de reacción similares en los distintos lechos, sin embargo, generalmente las características hidrodinámicas de dichos lechos no permanecerán similares. Por tanto, el régimen de flujo puede variar entre lechos grandes y pequeños incluso usando mismas partículas, velocidad superficial y tasa de circulación de partículas por unidad de área. Por tanto para el escalado es fundamental conocer estos cambios en las características hidrodinámicas del proceso que tienen influencia en las condiciones químicas y térmicas del mismo, mediante variaciones en el contacto G-S, tiempo residencial, circulación de sólidos y distribución de gas.

Para realizar el escalado de la planta se recurre a un modelo simplificado en frío, al utilizarlo se debe estar seguros de simular la hidrodinámica real del proceso, el cual puede encontrarse a mayores presiones y temperaturas.

### **2.6.2 Semejanza Fluidodinámica**

Al escalar un lecho fluido hay que considerar semejanzas:

- Geométrica.
- Cinemática.
- Dinámica.
- Química (si el lecho trabaja como reactor).

Para obtener las reglas de semejanzas se recurre a la adimensionalización de las ecuaciones fundamentales

Las relaciones generales de escalado a cumplir para lechos fluidos gaseosos (L.R. Glicksman, 1998) serán:

$$\underbrace{\left(\frac{\rho_s}{\rho_g}\right)}_{[8]}, \underbrace{\left(\frac{G_s}{\rho_s \cdot u_o}\right)}_{[9]}, \underbrace{\left(\frac{\rho_s \cdot d_p \cdot u_o}{\mu}\right)}_{[10]}, \underbrace{\left(\frac{\rho_g \cdot L \cdot u_o}{\mu}\right)}_{[11]}, \underbrace{\left(\frac{u_o^2}{g \cdot L}\right)}_{[12]}, \underbrace{\left(\frac{L}{D}\right)}_{[13]}, (\varphi_s), PSD, BG$$

Para construir un modelo a escala laboratorio que tenga un comportamiento similar a otro de mayor escala, todos los parámetros anteriores deben de tener el mismo valor en ambos sistemas.

Partiendo la ecuación general mostrada se obtiene una serie de ecuaciones simplificadas que se han usado para el escalado del lecho frío, dichas ecuaciones son las que se exponen a continuación:

A partir de la igualdad de la ecuación [8], para ambos sistemas (modelo y comercial), se determina el sólido que se va a seleccionar para ser alimentado en el modelo.

$$\left(\frac{\rho_s}{\rho_g}\right)_m = \left(\frac{\rho_s}{\rho_g}\right)_c \quad [14]$$

Conocida  $\left(\rho_g\right)_c$  y  $\left(\rho_s\right)_c$  a  $T^a = T$  y fijando un fluido tipo, por ejemplo aire a temperatura ambiente (al tratarse de un modelo frío), condición que me determina  $\left(\rho_g\right)_m$ , se obtiene el valor de  $\left(\rho_s\right)_m$  ya escalado. A partir de esa densidad se elige el sólido alimentado al modelo.

La ecuación se obtiene combinando el número de Reynolds basado en el diámetro del lecho [11] y la raíz cuadrada del número de Fraude.

$$Re_L \cdot Fr^{-1/2} = \frac{\rho_g \cdot L \cdot u_o}{\mu} \cdot \frac{\sqrt{g \cdot L}}{u_o}$$

Así obtenemos:

$$\left( \frac{L^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{g}}{\mu_c} \right)_m = \left( \frac{L^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{g}}{\mu_c} \right)_c$$

Reordenando,

$$\left( \frac{L_m}{L_c} \right) = \left( \frac{\mu_{c(m)}}{\mu_{c(c)}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad [15]$$

Según lo obtenido, todas las dimensiones del modelo serán escaladas a partir de las correspondientes dimensiones del lecho comercial (valores de diseño fijados), en función del cociente de las viscosidades cinemáticas ( $\mu_c$ ) del gas.

El parámetro usado para el escalado de la velocidad del gas en el lecho, se obtiene a partir del cociente del número de Reynolds basado en el diámetro del lecho [11] y del número de Reynolds basado en el diámetro de la partícula [12].

$$\frac{Re_L}{Re_{d_p}} = \frac{\rho_g \cdot L \cdot u_o}{\mu} \cdot \frac{\mu}{\rho_g \cdot d_p \cdot u_o}$$

Simplificando:

$$\left( \frac{L}{d_p} \right)_m = \left( \frac{L}{d_p} \right)_c \quad [16]$$

A partir del nº Froude y reordenando se obtiene:

$$\frac{u_{o(m)}}{u_{o(c)}} = \left( \frac{L_m}{L_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [17]$$

Así, se observa que la velocidad es escalada a partir de la longitud característica del lecho. Para satisfacer estas ecuaciones, se debe recordar que los números de

Reynolds y de Fraude deben mantenerse idénticos entre el modelo y el lecho comercial.

Para escalar el tiempo de residencia, también se recurre al cociente de viscosidades cinemáticas de gas:

$$\frac{t_{r(m)}}{t_{r(c)}} = \left( \frac{\mu_{c(m)}}{\mu_{c(c)}} \right)^{1/3} \quad [18]$$

En resumen las ecuaciones utilizadas para el escalado serán:

|                              |   |      |
|------------------------------|---|------|
| <b>Densidad del sólido</b>   | $\left( \frac{\rho_g}{\rho_s} \right)_m = \left( \frac{\rho_g}{\rho_s} \right)_c$     | [14] |
| <b>Longitud constructiva</b> | $\left( \frac{L_m}{L_c} \right) = \left( \frac{\mu_{c(m)}}{\mu_{c(c)}} \right)^{2/3}$ | [15] |
| <b>Velocidad gas</b>         | $\frac{u_{o(m)}}{u_{o(c)}} = \left( \frac{L_m}{L_c} \right)^{1/2}$                    | [17] |
| <b>Tiempo de residencia</b>  | $\frac{t_{r(m)}}{t_{r(c)}} = \left( \frac{\mu_{c(m)}}{\mu_{c(c)}} \right)^{1/3}$      | [18] |

### 2.6.3 Modelos Fríos

Una aplicación práctica de estos grupos adimensionales es el escalado de lechos fluidos industriales (como el diseñado como referencia) a equipos fríos a escala laboratorio. Para ello, de forma preliminar se estima la temperatura, presión, velocidad superficial, es decir, condiciones de operación que deben satisfacer dichos grupos adimensionales. Para posteriormente seleccionar las dimensiones del modelo, flujos de alimentación, tipo de partículas que conforman el lecho, etc.

En los criterios de escalado expuestos se observa que todas las dimensiones de escalado, son proporcionales a un factor de escalado (L), el cual será la dimensión característica del lecho fluido.

Si se aplica la estrategia de escalado descrita, el modelo frío simulado y la planta comercial diseñada operaran con unas condiciones fluidodinámicas equivalentes.