

# FLUIDIZACION:

## APLICACIONES INDUSTRIALES

**P**or fluidización se denomina a una de las varias operaciones que tienen por objeto contactar un sólido con un fluido. Cuando una columna de material sólido granular es sometida a la acción de un flujo ascendente de fluido, se expande y en esta circunstancia la columna de sólido puede presentar, en condiciones particulares, propiedades que se asemejan bastante a las propiedades de los fluidos; motivo por el cual este tipo de lecho se denomina "lecho fluidizado".

Las características de fluido más relevantes que presentan los lechos fluidizados son las siguientes:

- El lecho toma la forma del recipiente que lo contiene.
- La superficie superior conserva la horizontal, aunque el lecho se incline.
- Un objeto cuya densidad sea inferior a la densidad del lecho flotará y uno de densidad superior se hundirá.
- Al conectar dos lechos de distinta altura, éstas tienden a igualarse por el principio de los vasos comunicantes.
- La diferencia de presión entre dos puntos a distinta altura del lecho es aproximadamente igual al peso del lecho entre los dos puntos por unidad de sección del lecho.
- El lecho escurre como un líquido a través de orificios

con un flujo proporcional a la raíz cuadrada de la altura del lecho sobre el orificio.

### DESCRIPCION DEL FENOMENO DE LA FLUIDIZACION

Cuando hacemos pasar una corriente ascendente de fluido a muy baja velocidad a través de un lecho de partículas sólidas, el fluido escurre por los huecos que dejan las partículas con una pérdida de carga que es función de la velocidad del fluido. Esta situación se denomina lecho fijo o lecho percolado.

Al aumentar gradualmente la velocidad de flujo, la fricción entre el fluido y las partículas aumenta, observándose por lo tanto, una mayor pérdida de carga del fluido. A una cierta velocidad, las partículas comienzan a separarse unas de otras, vibrando alrededor de su posición, pero sin cambiar la situación relativa con respecto a las demás partículas. Este estado se llama lecho expandido.

A velocidades mayores se llega a una situación en la que todas las partículas están suspendidas en la corriente ascendente de fluido. En este punto la fuerza de roce entre la partícula y el fluido es igual al peso de la partícula, la componente vertical de las fuerzas compresivas entre partículas desaparece y la pérdida de carga del lecho es igual al peso del lecho por unidad de sec-

ción (peso del sólido más peso del fluido). El lecho se considera en estado incipiente de fluidización o lecho en el mínimo de fluidización.

El comportamiento del lecho fluidizado, a velocidades superiores al mínimo de fluidización dependerá si el fluido es un líquido o un gas.

### FLUIDIZACION CON LIQUIDOS

Este tipo de fluidización se denomina comúnmente como fluidización homogénea o particulada.

El aumento del flujo por sobre el mínimo de fluidización produce una expansión progresiva y homogénea del lecho. Bajo condiciones normales no existen mayores inestabilidades y no se observan burbujas grandes o he-



**Dr. Ingeniero Marco A. Solar B.**  
Profesor Jornada Completa  
del Departamento de Metalurgia  
de la U.T.E.

terogeneidades. El lecho presenta una superficie superior definida y se denomina fluidización en fase densa. A mayor velocidad algunas partículas son arrastradas por el fluido y forman una fase diluida sobre el lecho. Este estado se denomina fluidización en dos fases. Las partículas más finas forman la fase diluida superior y las más pesadas, la fase densa inferior. Esta es una condición relativamente inestable y eventualmente la mayor parte de las partículas livianas se perderán del sistema.

A velocidades aún mayores, el lecho entero es arrastrado por el líquido, formando una fase diluida de sólido en suspensión, que habitualmente se refiere como transporte hidráulico.

#### FLUIDIZACION CON GASES

Este tipo de fluidización se denomina generalmente como fluidización agregativa, fluidización heterogénea o simplemente fluidización gaseosa.

Este modo de fluidización tiene un comportamiento totalmente diferente al anterior. Aumentando la velocidad por sobre el mínimo de fluidización, se producen grandes inestabilidades con formación de burbujas y acanalamiento. A velocidades aún mayores, el movimiento de las partículas es más vigoroso, haciendo más violenta la agitación; la expansión del lecho es mínima, ya que no aumenta mucho más que la correspondiente al inicio de la fluidización.

Se llama lecho fluidizado en fase densa cuando el lecho tiene una superficie superior claramente definida. Sin embargo, a una velocidad suficientemente alta puede excederse la velocidad terminal de las partículas livianas y estas comienzan a ser arrastradas fuera del lecho, desapareciendo la superficie superior. En este punto tenemos lecho fluidizado en fase difusa o diluida con

transporte neumático de sólido.

#### ACANALAMIENTO DE LECHOS GRANULARES

El lecho fijo con una porosidad  $\epsilon_0$ , puede expandirse de manera no uniforme hasta alcanzar la porosidad del mínimo de fluidización  $\epsilon_{mf}$ . Incluso no se produce la fluidización en algunos casos, ya que el fluido toma ciertos caminos preferenciales, quedando el resto de las partículas relativamente sin contactar. Los parámetros que inciden en la aparición de este fenómeno son: La granulometría del sólido a fluidizar, el tipo de distribuidor utilizado para dispersar el fluido, y la razón altura a diámetro del lecho.

El acanalamiento se presenta, tanto en equipos pequeños como en grandes instalaciones. Las causas precisas de la formación de estos caminos preferenciales, no son del todo conocidas, por lo tanto, sistemas que tienen tendencia a canalizarse ofrecen grandes dificultades de escalamiento. Desde el punto de vista del proceso, el acanalamiento es desfavorable, ya que la eficiencia del contacto entre el sólido y el fluido, así como las transferencias de calor y masa disminuyen. Además, los perfiles de temperatura en el lecho son erráticos. El acanalamiento se produce de preferencia para velocidades cercanas al mínimo de fluidización, por lo tanto se recomienda trabajar a la velocidad más alta que permita el sistema. Otra manera de minimizar el acanalamiento es un diseño adecuado de la placa distribuidora del gas de fluidización, y la inserción de bafles en el interior del lecho.

Dependiendo de la magnitud del acanalamiento, puede no producirse la fluidización y a velocidades suficientemente altas, el sistema pasa directamente al estado de fase dispersa con arrastre de sólidos.

#### SLUGGING EN LECHOS GRANULARES

Se define por este término una condición en la cual las burbujas de gas coalescen formando burbujas de diámetros cada vez mayores y que pueden llegar a ser del orden de magnitud del diámetro del lecho. Debido a su tamaño, las burbujas empujan fuera del límite superior del lecho porciones de material sólido, originando así una masa dispersa sobre la fase densa.

El fenómeno no depende solamente de las características del sólido, el lecho puede comenzar a fluidizar normalmente produciéndose el slugging sólo a velocidades elevadas.

El slugging se produce de preferencia en equipos que tienen grandes razones altura-diámetro, y tiene un efecto negativo en el tiempo de contacto gas-sólido.

El uso de bafles especialmente diseñados logran minimizar o impedir totalmente este fenómeno.

#### VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL LECHO FLUIDIZADO FRENTE A OTROS CONTACTORES FLUIDO-SOLIDO

El lecho fluidizado tiene aspectos deseables e indeseables frente a otro tipo de contactores fluido-sólido.

##### Ventajas

- El comportamiento de fluido que tiene el sistema permite operaciones continuas controladas automáticamente y con gran facilidad de manejo.
- La mezcla rápida del sólido lleva a condiciones de operación con gradientes de temperatura casi nulos dentro del lecho, por lo que la operación puede ser controlada en forma simple.
- La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible el transporte entre ellos de grandes cantidades de calor.

- Es aplicable a operaciones en gran escala.
- Las velocidades de transferencia de masa y calor entre el fluido y la partícula son grandes cuando se comparan con otros métodos de contacto.
- La velocidad de transferencia de calor, entre un lecho fluidizado y un objeto sumergido en él, así como con las paredes del lecho, es alta.

#### Desventajas

- La gran desviación del fluido al escurrimiento pistón, así como el bypass del sólido por las burbujas, representa un sistema de baja eficiencia en el contacto fluido-sólido. Esto es especialmente serio cuando se requiere una alta conversión del fluido.
- La rápida mezcla de sólidos en el lecho produce una distribución de tiempos de residencia no uniforme. Para operaciones en continuo, las partículas presentan diferentes grados de conversión, y con eficiencia global baja, si se trabaja en equipos de una sola etapa.
- Los sólidos fácilmente desmenudizables se destruyen rápidamente siendo arrastrados por el fluido fuera del lecho.
- La abrasión, de las cañerías, fittings, y equipos, producida por las partículas puede ser severa.
- En operaciones no catalíticas a altas temperaturas, la aglomeración y sinterización de las partículas finas exige bajar la temperatura de operación, reduciendo, por lo tanto, la velocidad de reacción.

#### Aplicaciones Industriales del lecho fluidizado

A pesar de las desventajas enumeradas anteriormente, comparativamente las ventajas son mayores y son las responsables de la exitosa aplicación del lecho fluidizado en escala industrial.

El lecho fluidizado encuentra su campo de aplicación en una

gran variedad de procesos industriales fluido-sólido, de naturaleza tanto física como química.

#### Aplicaciones a procesos físicos

Comprende todos aquellos procesos en que tanto el sólido como el fluido no experimentan transformación química, produciéndose sólo una transferencia de masa y/o calor entre ambas fases, o entre el lecho y el ambiente. Entre estos procesos destacan.

#### Transporte de polvos

Las características del fluido que presenta el lecho fluidizado permite el transporte de material sólido pulverizado. El sistema de transporte consiste normalmente en un ducto de sección rectangular, con una leve inclinación horizontal, dividido en dos cámaras por un tamiz que cumple las funciones de placa distribuidora del gas. Al estado fluidizado, el sólido escurre fácilmente por efecto de la gravedad.

Este sistema tiene un bajo consumo de energía, no tiene partes móviles, y es apropiado para el transporte horizontal de partículas finas y secas, tales como cemento, ceniza de soda, harinas, resinas, etc.

#### Mezcla de polvos

Con las técnicas convencionales es difícil de mezclar íntimamente diferentes clases de materiales sólidos finamente divididos. Sin embargo, la fluidización de los sólidos hace posible la recirculación de ellos en el recipiente que los contiene produciéndose, por lo tanto, una buena mezcla. El grado de mezcla y el tiempo necesario para uniformar el lecho depende del flujo de gas y del tipo de placa distribuidora.

#### Intercambio de calor

Los lechos fluidizados han sido utilizados extensamente, para el intercambio de calor, debido a su gran capacidad para transportar calor y de mantener

una temperatura uniforme a través del lecho.

Los procesos que requieren una eficiente transferencia de calor entre un sólido y un fluido, emplean la técnica del lecho fluidizado para alcanzar dicho fin.

También son utilizados como fluidos térmicos, ya sea para transportar calor, entre dos equipos de procesos, o como fuente de calor a temperatura constante.

#### Secado

La gran velocidad de transferencia simultánea de calor y masa que presenta el lecho fluidizado hace posible el secado de grandes cantidades de sólidos granulares con tiempos de contacto relativamente cortos, dando un producto de mejor calidad y con menor consumo de energía que los secadores convencionales.

La alta eficiencia térmica se debe a la gran diferencia de temperatura entre los gases caliente de entrada y la baja temperatura del lecho en el cual ocurre el secado. Sin embargo, para materiales térmicamente sensibles, es necesario bajar la temperatura de entrada de los gases, disminuyendo, por lo tanto, la eficiencia térmica.

#### APLICACIONES A PROCESOS QUÍMICOS

Las aplicaciones químicas pueden agruparse a grandes rasgos en:

- a. Procesos en los cuales interesa la conversión del fluido: en este grupo se encuentran todas las reacciones en que el sólido se comporta como un catalizador o como fuente de calor.
- b. Procesos en los cuales interesa la conversión del sólido: en este grupo se encuentra la mayoría de las reacciones de interés metalúrgico; reducciones, tostaciones, calcinaciones, etc.

### Procesos de conversión del fluido

El sólido actúa generalmente como catalizador. Se emplea el lecho fluidizado en este tipo de procesos, porque permite un control estricto de la temperatura en la zona de reacción, puesto que las reacciones catalíticas pueden:

- ser explosivas fuera de rangos muy estrechos de temperatura.
- originar productos secundarios indeseables fuera del rango de operación normal.
- generar puntos calientes en el lecho que destruyen localmente el catalizador, ya sea físicamente por choque térmico, o desactivándolo químicamente por recristalizaciones.
- generar grandes cantidades de calor que deben ser evacuadas rápidamente del sistema reaccionante.

Ya que el fluido generalmente tiene malas características de transferencia de calor y baja capacidad calorífica comparada con el calor de reacción, es difícil de alcanzar el control de la temperatura en lechos fijos. Se necesita grandes superficies intercambiadoras y a menudo se requiere una gran dilución de los gases respectivos. Este control de temperatura es mucho más fácil de obtener en los lechos fluidizados; ya que la rápida circulación de los sólidos de capacidad calorífica relativamente alta distribuye eficientemente el calor dentro del sistema y ayuda a prevenir la formación de posibles puntos calientes.

Algunas de las reacciones catalíticas más importantes que industrialmente se realizan en lecho fluidizado son:

#### Reacciones de síntesis.

- Oxidación controlada de olefinas y aromáticos: tenemos entre ellas la obtención de óxidos de propileno y etileno,

oxidación parcial del naftaleno para obtención de anhídrido ftálico, obtención de acrilonitrilo, etc.

- Halogenación de olefinas: para la obtención de halogenuros de alquilo, materia prima básica para la alquilación de aromáticos.
- Síntesis de hidrocarburos por la reacción de Fischer-Tropsch: obtención de hidrocarburos a partir de  $H_2$  y CO a bajas presiones.

#### Reacciones de cracking y reforming catalítico de hidrocarburos

El rompimiento de los hidrocarburos en moléculas de menor peso molecular (reacciones de cracking) o su síntesis en moléculas de mayor peso molecular (reforming) tienen dos hechos comunes: las reacciones son endotérmicas y producen un depósito de carbón sobre las superficies sólidas. Estas dos características y el hecho que deban tratarse grandes cantidades de reactivos hacen atractivo el uso del lecho fluidizado para tales operaciones. Básicamente, estos procesos utilizan dos lechos fluidizados, en el primero llamado reactor se produce la reacción catalítica depositándose el carbón sobre el catalizador, el cual es retirado y mediante transporte neumático es llevado al regenerador donde se insufla aire para quemar carbón, regenerándose y calentándose el catalizador el cual es retornado nuevamente al reactor aportando de este modo el calor necesario para la reacción endotérmica. Prácticamente todos los procesos industriales de cracking y reforming operan de este modo.

La mayor aplicación para este tipo de procesos se encuentra en la industria de refinación del petróleo, la cual en la década del 40 fue la pionera en el desarrollo de la técnica del lecho fluidizado, debido principalmente al alto consumo de gasolina durante la Segunda Guerra Mundial.

#### Procesos que interesa el sólido

En este tipo de procesos generalmente se requiere una alta velocidad de transferencia de masa y calor entre el fluido y el sólido. El lecho fijo presenta el inconveniente que las velocidades de transferencias son pequeñas comparadas con el lecho fluidizado. Normalmente las reacciones en lecho fluidizado no están limitadas por las transferencias en la capa límite, ya que éstas son mucho más rápidas que las transformaciones que ocurren en el interior del grano, siendo todo lo contrario para el caso del lecho fijo.

Por otra parte, el lecho fluidizado permite tratar grandes cantidades de sólido en forma fácil, sin embargo presenta el inconveniente que si el reactor es de una sola etapa, el sólido no sale con una conversión uniforme.

La mayor aplicación para este tipo de procesos se encuentra en la industria metalúrgica, la cual lo emplea en:

#### Tostación de sulfuros:

Estas operaciones se caracterizan todas por ser altamente exotérmicas, generalmente son reactores de una etapa, no se necesita calor externo, sino que, por el contrario, están provistos de refrigeración. Comparado con otro tipo de reactores poseen una mayor capacidad, requieren un menor exceso de aire sobre el teórico, produciendo por lo tanto un gas de mayor contenido de  $SO_2$  apto para la fabricación de  $H_2SO_4$ .

El primer tostador industrial de sulfuros fue construido por Dorr-Oliver en 1947 en Ontario, Canadá, para tostar minerales auríferos arsenopiríticos a fin de producir una calcina apta para cianuración. En 1952, Dorr-Oliver instaló en New Hampshire, un tostador de sulfuros para la obtención de  $SO_2$ .

Independientemente BASF, en Alemania inició los estudios

de tuesta en lecho fluidizado, instalando en 1950 Ludwigshafen un tostador con una capacidad de 30 ton/día, construyéndose en 1952 una planta de 120 ton/día.

Al mismo tiempo, la Compañía de Manufacturas Químicas Sumimoto de Japón desarrolló un sistema de tostación en lecho fluidizado, publicando en 1952 antecedentes sobre la producción industrial de SO<sub>2</sub> en alta concentración, construyendo su primera unidad en su planta de Niihasma.

Los tostadores de lecho fluidizado reemplazaron progresivamente los tostadores de lecho fijo y de horno rotatorio empleados en la industria del ácido sulfúrico y en la industria metalúrgica.

La principal aplicación está en la tostación de piritas, y de

concentrados de minerales sulfurados de Cu, Zn y Mo.

#### Reducción de óxidos metálicos:

El lecho fluidizado ha sido aplicado principalmente a la reducción de óxidos de fierro. El estudio se intensificó en los últimos 20 años especialmente en los Estados Unidos. El propósito de estos estudios ha sido desarrollar un proceso para producir fierro y acero a partir de finos de alta ley, o más importante aún, el posible reemplazo del alto horno, como proceso básico para producir fierro.

A continuación presentamos una tabla donde se indican los principales procesos industriales en lecho fluidizado aplicados, así como sus características generales.

Finalmente, podríamos señalar

que el gran auge comercial de los procesos en lecho fluidizado ha sido el resultado de numerosos ensayos y pruebas no siempre exitosas. Las dificultades en el escalamiento desde la etapa de laboratorio a planta industrial se deben a la falta de respuestas adecuadas a las muchas interrogantes en que se basan las decisiones para el diseño y esto se debe a su vez a la carencia de buenas correlaciones que predicen el tiempo de contacto fluido-sólido en el interior del lecho en función de las variables de operación. Sin embargo, las utilidades que han acompañado los desarrollos exitosos en el pasado, hacen que se continúen haciendo esfuerzos en las investigaciones y desarrollo de aplicación del lecho fluidizado a nuevos procesos.

### PROCESOS EN LECHO FLUIDIZADO PARA LA REDUCCIÓN DE OXIDOS DE FIERRO

1. PROCESO	H-Iron	Esso Research	Nu-Iron	Noralfer
2. PAÍS	U.S.A.	U.S.A.	U.S.A.	Francia
<b>3. MODO DE FUNCIONAMIENTO</b>				
Etapas	3	2	—	—
Continuo	No	Sí	Sí	Sí
Recirculación de gas	Sí	No	Sí	Sí
Tipo de instalación	Industrial	Piloto	Piloto	Piloto
Producción Ton/día	50	1	5	10-15
Temperatura de trabajo (°C)	500	700-900	600-760	750-800
Presión de trabajo (Atm)	35	0-2	0-4	Normal
<b>4. MATERIAL A REDUCIR</b>				
Espécie	Mag. Hem., Conc. (33-72%)	Hem (60-70%)	Hem (60-70%)	Hem (40-70%)
Granulometría (mm)	1	3	3	1
<b>5. GAS REDUCTOR</b>				
Composición gas reductor	H <sub>2</sub> 97%, N <sub>2</sub> 3%	CO 21%, H <sub>2</sub> 41%, N <sub>2</sub> 38%	H <sub>2</sub> 75%, CO 14%, N <sub>2</sub> 10%	CO 40%, H <sub>2</sub> 30%, N <sub>2</sub> 30%
<b>6. MATERIAL PRODUCIDO</b>				
Tipo de producto	Fierro esponja	Fierro esponja	95 máx.	90-92
Fierro total %	98% máx.	95 máx.	90 máx.	90
Fierro metálico %	96% máx.	90 máx.	95 máx.	90-92
Porcentaje de reducción	98% máx.	95 máx.	95 máx.	90-92
Utilización briqueta o polvo	Briqueta	Briqueta	Briqueta	Polvo