

EFEECTO DE LA PRESENCIA DE ARREGLOS HORIZONTALES DE TUBOS SOBRE LA HIDRODINAMICA DE LECHOS FLUIDIZADOS

EFFECT OF THE PRESENCE OF HORIZONTAL TUBE ARRAYS ON THE HYDRODYNAMICS OF FLUIDIZED BEDS

R. S. Ruíz-Martínez^{1*}, J. del Real-Olvera² y M. G. Vizcarra-Mendoza¹

¹ Universidad Autónoma Metropolitana-I, Depto. de I. P. H., Area de Ingeniería Química, Av. San Rafael Atlixco 186, Col. Vicentina, C. P. 09340, México, D. F.

² Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Química y Ambiental, Zona Xalapa, Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91040, Xalapa-Eqz., Ver., México.

Recibido 11 Julio 2005; Aceptado 9 Febrero 2006

Resumen

Se estudia el efecto de la presencia de un haz de tubos horizontales, con arreglos alineados y escalonados, sobre la hidrodinámica de lechos fluidizados gas-sólido. Para ello, basados en mediciones con sondas de presión, se evalúa el impacto del arreglo y la velocidad de fluidización sobre la expansión del lecho, la distribución espacial y tamaño de las burbujas, y el retromezclado de gas en el lecho. De los resultados obtenidos se puede sugerir que la presencia de los tubos reduce el tamaño de las burbujas y modifica la distribución lateral de éstas en el lecho. Adicionalmente, se encuentra que los sistemas con tubos tienden tanto a expandirse en menor proporción que los sistemas sin ellos, como a mostrar un menor grado de retromezclado de gas.

Palabras clave: lechos fluidizados, hidrodinámica, haz de tubos, burbujas, retromezclado.

Abstract

The effect of the presence of a horizontal tube array on the hydrodynamics of a gas-solid fluidized bed has been studied for both aligned and staggered tube arrangements. Based on pressure probe measurements the impact on bed expansion, bubble size and distribution in the bed, and on gas backmixing has been evaluated. It has been found that the presence of tubes can reduce the size of bubbles and their distribution in the bed. It was also observed that both bed expansion and gas backmixing occurred at a lower extent in the beds with tubes than in the open beds.

Keywords: fluidized beds, hydrodynamics, tube array, bubbles, backmixing.

1. Introducción

Los sistemas de lecho fluidizado son ampliamente usados como reactores en la industria química y petroquímica y esto se debe, en buena medida, a que entre las principales características de estos sistemas se tiene que las partículas del lecho están en continuo movimiento y por ello normalmente se encuentran bien mezcladas. Como resultado, es posible disipar rápidamente puntos calientes y lograr que el lecho opere esencialmente en forma isotérmica. También, como resultado del movimiento de los sólidos, es posible lograr altas tasa de transferencia de calor entre el lecho y superficies de contacto, lo que permite un buen control de temperatura del lecho. Sin embargo, existen desventajas

como el acanalamiento del lecho por gas en las burbujas, y retromezclado axial de gas, los cuales pueden afectar significativamente la conversión de reactivos y rendimiento de productos. Con el propósito de controlar la temperatura en estos reactores, frecuentemente se sumergen en el lecho bancos de tubos intercambiadores de calor para adicionar o remover calor, por lo que contar con la capacidad de transferencia de calor necesaria resulta ser una importante variable de diseño de estos sistemas. Sin embargo, la presencia de estos arreglos de tubos representa un obstáculo al paso de las burbujas y por ello puede afectar el flujo de éstas y su tasa de crecimiento (Yates y Ruiz-Martínez, 1987; Yates y col., 1990; Hull y Agarwal, 1995) y con ello, impactar a su vez tanto en el contacto gas-sólido

*Autor para la correspondencia: E-mail: rnr@xanum.uam.mx
Tel. 580404649/51 Ext. 230, Fax: 58044900

como en la movilidad de los sólidos, afectando así el propio fenómeno de intercambio de calor con los tubos (Xavier y Davidson, 1985; Hull y col., 2000; Kim y col., 2003; Deshmukh y col., 2004; Rasouli y col., 2005). Si bien la presencia de los tubos afecta tanto la hidrodinámica como el transporte de calor, se observa que en la literatura existen comparativamente menos estudios publicados sobre la hidrodinámica en estos sistemas. En el presente trabajo se estudia el efecto de las características de un haz de tubos horizontales sobre el comportamiento hidrodinámico del lecho, y específicamente sobre la tasa de crecimiento de las burbujas y el retromezclado del gas en la fase emulsión.

2. Metodología experimental

En la Fig. 1 se presenta el diagrama esquemático del sistema experimental. Consiste en un recipiente de área transversal cuadrada, fabricado con lámina galvanizada de 0.30 x 0.30 m. en cada lado y una altura total de 1.85 m. Como distribuidor de gas se utilizó un plato perforado de acrílico de 0.005 m de espesor; los orificios fueron de 0.002 m de diámetro en arreglo triangular, con 440 orificios/m² y una área abierta menor al 0.14%. Para evitar que los sólidos cayeran a

través de las perforaciones, se colocaron sobre el distribuidor dos mallas delgadas metálicas del número 100 (0.15 mm de apertura promedio). En el recipiente se fluidizó arena, con un diámetro promedio de partícula de 250 micrómetros, una esfericidad de 0.86, fracción vacía del lecho igual a 0.43 y velocidad mínima de fluidización de 0.03 m/s. La densidad del sólido fue de 2645 kg/m³, mientras que la altura total del lecho de partículas sobre el plato distribuidor fue 0.45 m. Las características del sólido empleado coinciden con la de tipo B de la Clasificación de Geldart (Geldart, 1973), esto se buscó con la intención de generar burbujas de tamaño relativamente grande desde un principio (según Geldart, la categoría B contiene a aquellos sólidos con diámetro aproximado de partícula entre 60 y 500 micrómetros y densidades de entre 1400 y 4500 kg/m³). Para fluidizar, se utilizó aire de la línea de servicio del laboratorio a temperatura ambiente y presión atmosférica, previamente filtrado para eliminar posibles residuos de agua y aceite. Se manejó un intervalo de velocidades entre 0.09 a 0.14 m/s, los cuales se midieron con rotámetros tipo placa perforada.

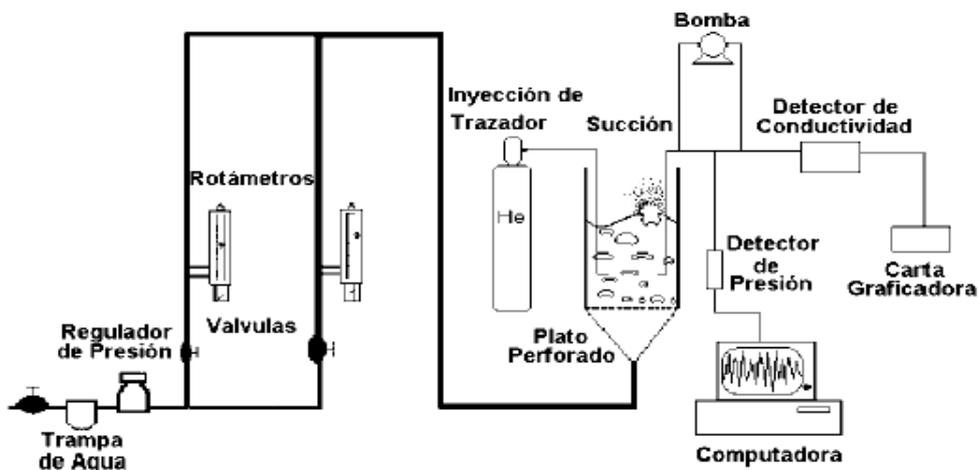


Fig. 1. Diagrama esquemático del sistema experimental.

En los experimentos se evaluó el efecto de bancos de tubos sobre distintos aspectos de la hidrodinámica del lecho, tales como la expansión del lecho, las características de burbujeo, y el retro mezclado de gas. Para las mediciones de la intensidad de burbujeo y para la expansión del lecho se utilizaron transductores de presión marca Cole-Parmer con una capacidad de operación de 0 a 25 pulgadas de agua y una incertidumbre reportada de $\pm 1\%$, conectado a sondas como las esquematizadas en la Fig. 2. Se emplearon dos tipos de sondas de presión, una diferencial y otra manométrica, las cuales se fabricaron con tubos de cobre de 0.00318 m de diámetro nominal con las características descritas en la Fig. 2. Cada sonda se montó sobre otro tubo de cobre de 0.00636 m de diámetro que le sirvió de soporte y guía.

2.1. Intensidad de burbujeo

La medición de la frecuencia y amplitud de las fluctuaciones de presión se realizó con la sonda diferencial (Fig. 2 (a)).

La señal de salida del transductor se conectó a un indicador digital y de éste al sistema de adquisición de datos computarizado, el cual consistió en una computadora a 12 MHz acondicionada con una tarjeta de adquisición de datos de alta velocidad marca Omega, modelo DAS-16G. La velocidad a la cual fueron capturados en la computadora los datos de presión diferencial fue de 10 Hz. En cada una de las mediciones se obtuvieron 2048 datos, lo que en tiempo representó poco más de 20 segundos por medición, más aún, se realizaron tres réplicas en cada ensayo con lo que se logró obtener un tiempo total mayor a 60 segundos para cada una de las posiciones. De acuerdo con estudios estadísticos preliminares, se determinó que con este número de réplicas, el resultado no era significativamente diferente a aquel realizado con un mayor número de repeticiones. Por otro lado, la velocidad de muestreo seleccionada demostró en el mismo estudio ser aceptable para las características del sistema analizado.

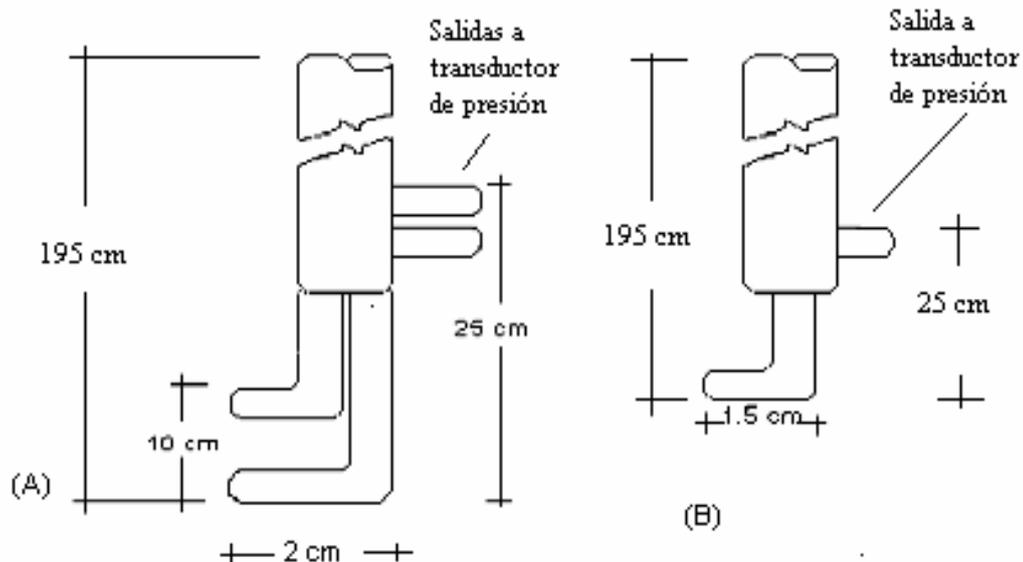


Fig. 2. Diagrama de las sondas que fueron empleadas para la cuantificación de la presión (a) diferencial y (b) manométrica.

2.2. *Expansión del lecho*

Los registros de la expansión del lecho se realizaron con la ayuda de una sonda de cobre (Fig. 2 (b)). Se obtuvieron lecturas de presión a lo alto del sistema, con 0.01 m de separación entre puntos de lectura contiguos dentro del lecho y en la zona diluida por encima del lecho y, precisamente, en la transición entre estas dos regiones se registra un cambio significativo en la magnitud de la presión medida, de lo cual se obtiene la altura promedio del lecho. En estos experimentos, las mediciones fueron enviadas directamente a una carta graficadora marca Goerz modelo Se-120, la cual operó a una velocidad de 60 cm/h. Las lecturas promedio de presión a cada altura en el sistema se obtuvieron de promediar valores capturados en un intervalo conveniente de tiempo (2 a 5 minutos) una vez alcanzado el estado estable. Con el propósito de no perder o atenuar demasiado las señales de presión, se adaptó el sistema de tal manera que se logró alcanzar la mínima distancia posible entre las diferentes zonas de muestreo y el transductor. Para evitar al máximo los posibles conflictos, se conectaron la sonda y el transductor a través de mangueras delgadas de 0.005 m de diámetro externo introducidas por un costado del reactor a una altura aproximada de 0.70 m. De esta manera se pudo asegurar que la señal de presión llegaron con mayor intensidad al transductor.

2.3. *Retromezclado de gas*

La cuantificación del retromezclado del gas se llevó a cabo empleando la técnica de estímulo-respuesta. Para esto se utilizó como trazador helio de alta pureza por ser un gas inerte, no tóxico y con buena diferencia de conductividad con respecto al aire. El gas fue inyectado en la superficie fluctuante del lecho (zona en la que revientan las burbujas), con la ayuda de una sonda de cobre de 0.00318 m de diámetro introducida desde la parte superior del sistema; dicho gas es arrastrado hacia la

parte inferior del lecho. En esta técnica se considera que el retromezclado del gas es generado principalmente por el movimiento descendente de los sólidos. Para poder aplicar la técnica anterior, fue necesario extraer (succionando) la mezcla de los gases a diferentes alturas dentro del lecho de partículas, lo cual se realizó con un sistema de vacío que producía un flujo cercano a los 0.83 cm³/s. Una vez extraída la mezcla, ésta era enviada a un detector de conductividad térmica marca GOW-MAC modelo 40-400, para ser comparada con aire en condiciones atmosféricas, el cual era utilizado como gas de referencia; la diferencia en conductividad generada por ambos gases, producía una señal de salida de entre 0 y 390 mA de voltaje, la cual se registraba en una carta graficadora. Para interpretar las señales de retromezclado se preparó una curva de calibración para el intervalo de concentraciones manejado.

2.4. *Haz de tubos*

Para analizar y cuantificar los cambios hidrodinámicos generados por los tubos horizontales se consideraron arreglos geométricos tanto en forma escalonada (o triangular) como alineada (o rectangular) con la dirección vertical del flujo del gas, por ser éstos comúnmente empleados en los intercambiadores industriales. Para construir los arreglos tubulares, se instalaron barras cilíndricas de acrílico de 0.025 m de diámetro entre dos placas de acrílico con dimensiones de 0.50 m x 0.30 m. En ambas geometrías se mantuvieron constantes las distancias desde el distribuidor a la primera (0.17 m) y última (0.47 m) hilera de tubos. La separación horizontal de centro a centro en los tubos, cubrió un intervalo de 2 (arreglo alineado) a 4 veces (arreglo escalonado) el diámetro de los tubos, mientras que la distancia vertical fue siempre de dos diámetros. Estos valores en las separaciones de los tubos fueron propuestos originalmente por Sitnai (1982), quien las recomienda para ser empleadas en sistemas experimentales con excelentes resultados en la transferencia de calor.

2.5. Interrelación general entre propiedades del lecho

De acuerdo a la Teoría de las Dos Fases (Davidson y Harrison, 1963) el flujo de la fase burbuja, Q_B , está dado por:

$$Q_B = A(U - U_D) \quad (1)$$

donde U_D es la velocidad del gas en la fase densa, la cual se toma comúnmente como U_{mf} para polvos del grupo B de Geldart. En la práctica el flujo visible de gas en la fase burbuja es menor al predicho por la Ec. (1), y la situación real se puede aproximar por la expresión

$$Q_B = YA(U - U_{mf}) \quad (2)$$

donde Y varía con el tamaño de la partícula; para partículas de arena con características similares a las del presente trabajo se ha reportado un valor aproximado de 0.5 para Y (Baeyens y Geldart, 1986). La fracción ocupada por burbujas y la expansión del lecho para estas partículas se puede expresar respectivamente como (Geldart, 2004)

$$\varepsilon_B = \frac{Y(U - U_{mf})}{\overline{U}_{BS}} \quad (3)$$

$$y = \frac{H}{H_{mf}} = \frac{\overline{U}_{BS}}{\overline{U}_{BS} - Y(U - U_{mf})} \quad (4)$$

La velocidad de las burbujas en un sistema en el que el área de flujo se reduce por la presencia de filas de tubos puede estimarse con

$$\overline{U}_{BS} = \frac{Y(U - U_{mf})}{(1 - A_t/A)} + 0.711(gd_{BV})^{0.5} \quad (5)$$

A partir de estas ecuaciones es que se relacionan la fracción volumétrica ocupada por burbujas, la expansión del lecho, y el diámetro y la velocidad promedios de burbuja, de manera que si se dispone de información como la fracción de expansión

del lecho o el diámetro promedio de burbuja puede estimarse las demás variables.

3. Resultados y discusión

Por tratarse de un lecho fluidizado de sección transversal cuadrada, para propósitos de muestreo, se decidió seccionar en forma imaginaria el área transversal en nueve partes iguales de 0.1m x 0.1m. De estas, se tomaron 4 para realizar las cuantificaciones hidrodinámicas, mientras que las restantes se consideraron como "imagen espejo"; ya que al analizarlas por separado, las diferencias fueron mínimas y en su mayor parte no representaban discrepancias significativas. Por lo tanto, las secciones sombreadas de la Fig. 3 representan las posiciones seleccionadas para el análisis.

3.1. Expansión del lecho

En la Fig. 4 se presenta la fracción de expansión promedio del lecho con respecto a la altura a condiciones de fluidización mínima, tanto para el lecho abierto (sin tubos) como para los sistemas con tubos en arreglo escalonado y alineado. Es evidente que para la velocidad igual a 3 U_{mf} la expansión promedio del lecho es similar para los tres sistemas considerados, sin embargo cambia al incrementarse la velocidad superficial. La expansión del lecho se puede atribuir, en estos sistemas, tanto a la presencia de gas que fluye en forma intersticial entre los sólidos como a las características de las burbujas. En lo que respecta al flujo de gas en la fase densa, para partículas del grupo B de Geldart, éste permanece esencialmente en el valor correspondiente para condiciones de fluidización incipiente (Geldart, 2004). Por otro lado, se sabe que en un lecho abierto la velocidad de las burbujas tiende a aumentar con el tamaño de éstas, por lo que para un mismo flujo de gas, en general, puede esperarse una mayor expansión del lecho en sistemas con burbujas relativamente pequeñas que en otro con burbujas grandes.

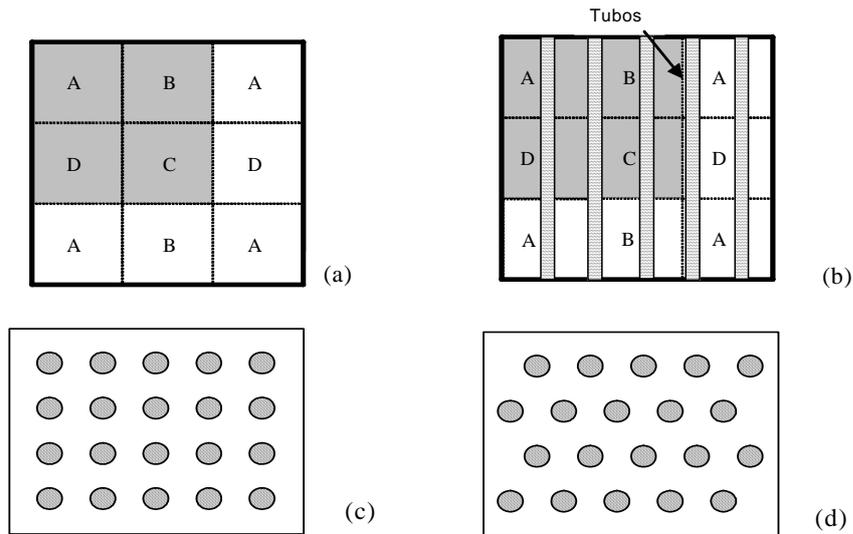


Fig. 3. Esquemización de la división transversal del lecho y zonas de muestreo (zona sombreada) para la vista superior de (a) lecho abierto y (b) lecho con tubos; y esquema de vistas laterales (c) del arreglo alineado y (d) del arreglo escalonado.

De los resultados presentados en la Fig. 4 se puede pensar que a una velocidad superficial del gas relativamente baja el tamaño de las burbujas no se ve afectado de manera importante por la presencia de los tubos, ya que las burbujas parecen ser lo suficientemente pequeñas como para no romperse por el impacto con los tubos. Por otro lado, un aumento en la velocidad superficial del gas muestra una reducción en la expansión del lecho, respecto al sistema abierto, por la presencia del banco de tubos, siendo mayor el efecto observado para el arreglo alineado. Esto puede atribuirse a una reducción del tiempo de residencia de las burbujas por un posible incremento en su tamaño por coalescencia, dentro del espacio del banco de tubos y, también, debido a que las características del arreglo de tubos pueden favorecer un flujo preferencial de burbujas que las acelere. Esto último, por lo menos, parece suceder de acuerdo a lo mostrado en la Fig. 5. En esta Fig. se presenta la dispersión relativa de la distribución de la expansión del lecho (definida como desviación estándar/valor medio de la expansión) para los tres sistemas considerados, y dos velocidades de fluidización. Es claro que la expansión del lecho no es uniforme en toda la sección

transversal debido a que las burbujas tienden a fluir de manera preferencial por algunas zonas del lecho.

A este respecto, a bajas velocidades el arreglo escalonado reporta claramente una distribución espacial más heterogénea que la del lecho sin tubos, sin embargo, para este mismo arreglo de tubos, al incrementarse la velocidad del gas, la expansión del lecho es comparativamente mucho más uniforme lo que habla de una mejor distribución de las burbujas en el lecho. Para el arreglo alineado de tubos las diferencias espaciales de expansión no cambian mucho con la velocidad y tienden a ser mayores que las observadas en el lecho abierto, principalmente debido a que se encontró una expansión relativamente baja en las esquinas del lecho (zona A en la Fig. 3).

3.2. Frecuencia de burbujeo

Se determinó la frecuencia de burbujeo a partir de las señales con la sonda diferencial (Fig. 2) a distintas alturas en el lecho para el sistema abierto y con bancos de tubos. En la Fig. 6 se presenta la frecuencia de burbujeo en función de la fracción de la altura total del lecho, a una velocidad superficial de $3 U_{mf}$. Las lecturas

para cada sistema corresponden a las obtenidas en las distintas zonas de muestreo consideradas (ver Fig.3).

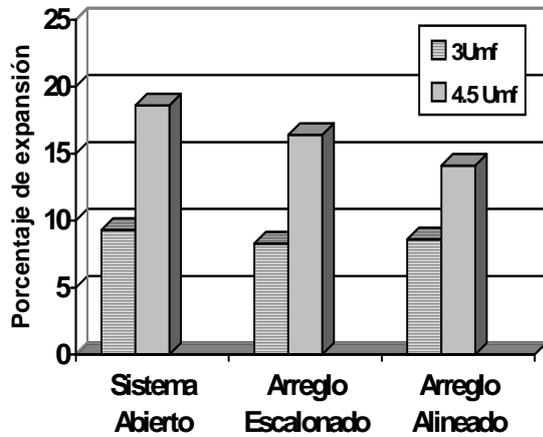


Fig. 4. Porcentaje de expansión del lecho a dos velocidades de fluidización para el sistema abierto y con un haz de tubos.

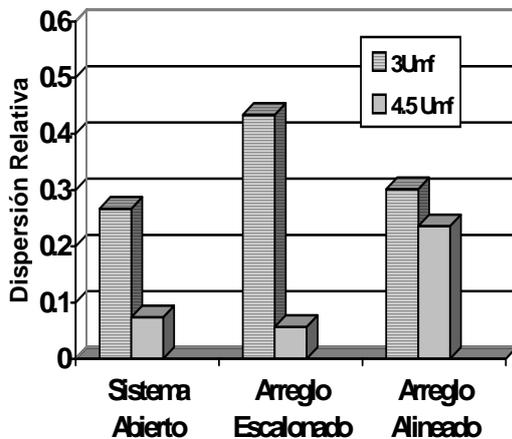


Fig. 5. Dispersión relativa de la distribución de la expansión del lecho sobre su sección transversal: desviación estándar/valor medio de la expansión.

Es evidente que la frecuencia de burbujeo es una función importante de la zona de muestreo, así, para un lecho abierto, las zonas A y B parecen predominar sobre las otras. También se observa una distribución heterogénea del burbujeo para el arreglo alineado de tubos. En cambio, el arreglo escalonado parece

generar una distribución de burbujeo más uniforme. En un sistema abierto las burbujas generadas en el plato distribuidor crecen a lo largo del lecho por coalescencia entre burbujas vecinas. Este proceso modifica no solamente la distribución de tamaño de burbujas sino también la distribución espacial y, por lo tanto, el camino que siguen las burbujas al ascender por el lecho. Así, un lecho de geometría cilíndrica que genera burbujas de forma uniforme sobre el plato distribuidor, tendrá una variación axial que concentra las burbujas hacia el centro del lecho. En cambio, en lechos cuadrados, por su geometría, no se espera que las burbujas tiendan a concentrarse en el centro, sino que se generen varias columnas de crecimiento. La presencia de un haz de tubos puede modificar la distribución de burbujas en el lecho. Obviamente dicho efecto dependerá de las características geométricas del banco de tubos (al respecto existen trabajos que sugieren que los arreglos escalonados tienden a producir una mejor distribución de burbujas que los arreglos alineados (Lockwood, 1977)). En la Fig. 7 se presenta el efecto de la velocidad de fluidización sobre la frecuencia de burbujeo promediada a distintas alturas del lecho. Comparativamente parece haber un ligero incremento en la frecuencia de burbujeo en el lecho con el arreglo alineado de tubos que en el escalonado. Un aumento en la velocidad superficial tiende a generar un incremento tanto en la densidad de burbujeo como en el tamaño de las burbujas, y el hecho de que no se perciba un incremento en la frecuencia de burbujeo en el sistema con arreglo escalonado puede significar que el gas en exceso $Y(U-U_{mf})$ se acomoda en burbujas de mayor tamaño. Este resultado parece corresponder con observaciones hechas con rayos-X por Yates y col. (1990), quienes encontraron la presencia de flujos preferenciales de burbujas dentro de bancos de tubos que tendían a coalescer a tasas mayores que en el correspondiente lecho abierto.

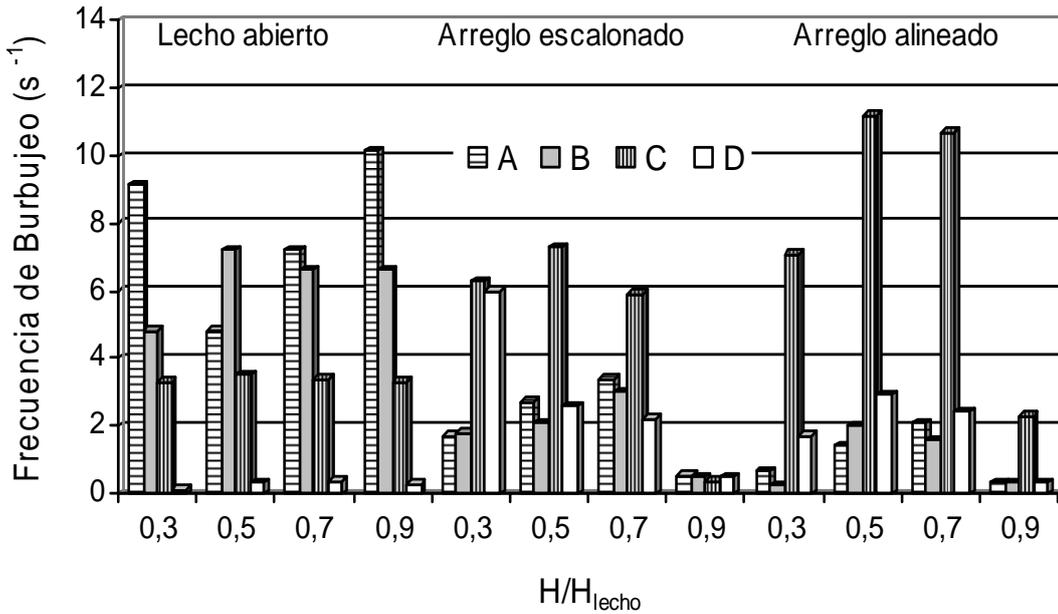


Fig. 6. Frecuencia de burbujeo en lecho sin y con tubos bajo arreglos de escalonado y alineado, medidos a distintas alturas relativas en el lecho, a la velocidad $3U_{mf}$, y en las zonas de muestreo A, B, C y D.

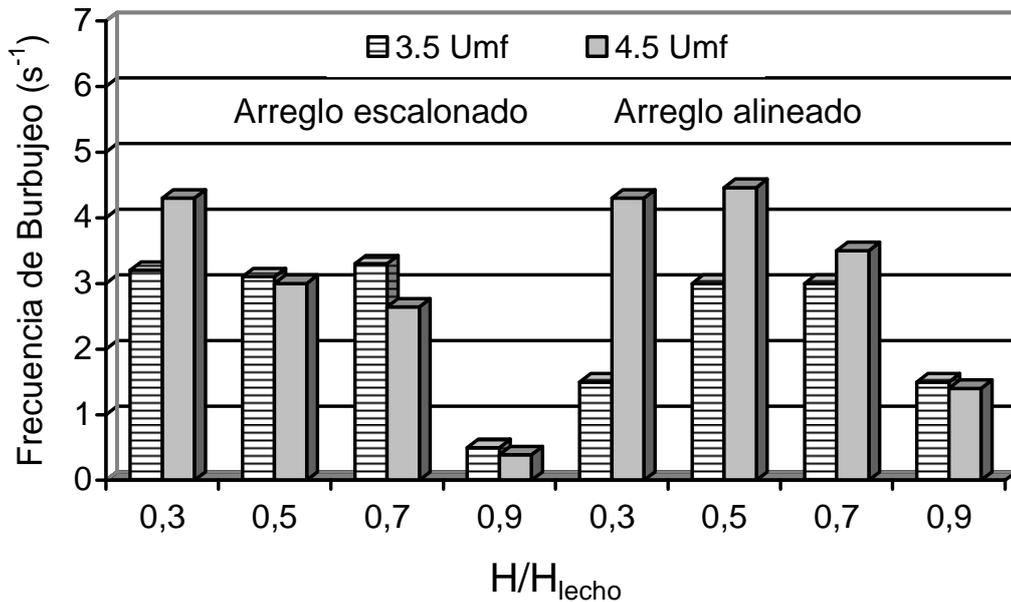


Fig. 7. Frecuencia de burbujeo promedio en función de la altura en el lecho en sistemas con bancos de tubos en arreglos escalonado y alineado.

3.3. Amplitud de la señal de burbujeo

Sondas de presión como la presentada en la Fig. 2(a) permiten obtener información sobre la magnitud de las burbujas que detecta. La operación de estas sondas se basa en el hecho de que existe un

campo de presión a lo alto de la burbuja, de manera tal que en la base de la burbuja la presión es menor que en el lecho circundante, y mayor la presión en la parte superior de ésta; esto ha sido verificado tanto experimental como teóricamente en la literatura (Davidson y Harrison, 1963). En

el caso de un lecho burbujeante, la señal esta influenciada por la distancia entre la sonda y la burbuja detectada, así como de la distribución de tamaños de éstas. Por ello, el valor reportado para distintas posiciones del lecho corresponde a un valor promedio de las amplitudes registradas.

En la Fig. 8 se presentan las variaciones en el lecho de la amplitud de la señal de burbujeo (expresada en mV) y, por ende, de la variación del tamaño de burbujas. En la Fig. 8 se presenta la amplitud promedio en varios puntos de muestreo a lo ancho de la cama y a distintas alturas relativas de ésta, para velocidades del gas de $3 U_{mf}$ y $4.5 U_{mf}$. Como se aprecia en la Fig., tanto para el sistema abierto como para los sistemas con tubos, se aprecia que en la mayor parte del lecho la amplitud promedio se encuentra en el intervalo de 0.09 a 0.10 mV, menos en la parte cercana a la superficie del lecho, donde la tasa de coalescencia de burbujas tienden a crecer con la erupción de éstas. El fenómeno observado al aumentar la velocidad de fluidización es el de un aumento en las amplitudes medidas como consecuencia del crecimiento de las burbujas.

En términos generales, para los sistemas con haz de tubos fluidizados a $3U_{mf}$, las amplitudes resultaron similares en magnitud a las del sistema abierto, lo que sugiere que a dichas condiciones la presencia de los tubos no parece alterar significativamente el tamaño de las burbujas. Sin embargo, al incrementarse la velocidad de fluidización se aprecia una reducción en las amplitudes medidas en los lechos con tubos con respecto a las del lecho abierto. Este resultado puede deberse a que un incremento en el flujo de gas produce un crecimiento en el tamaño de las burbujas, de manera que se propicia una mayor interacción de éstas con los tubos y, con ello, se altera su crecimiento al

generarse un proceso combinado de rompimiento y coalescencia dentro del espacio del banco de tubos (Yates y col., 1990).

En lo que respecta al efecto del arreglo, se observa que aun cuando la distribución de la fracción del número de burbujas con el arreglo alineado fue mayor por el centro (ver la Fig. 6), éstas no incrementaron notablemente su tamaño por esa zona, lo que sugiere que la separación horizontal de los tubos controló su crecimiento excesivo. Ahora bien, gracias al arreglo escalonado de los tubos en la geometría triangular, se observaron burbujas de tamaño similar a las originadas por la otra geometría. El diámetro mas grande que se presentó con el arreglo triangular fue preferentemente por el centro y las esquinas, lo que significa que esta geometría además de controlar el tamaño de las burbujas, también promueve una distribución transversal más uniforme.

Como se puede ver de la Fig. 9, parece haber una tendencia a la presencia de amplitudes de un tamaño relativamente constante en el banco de tubos, y este efecto es más apreciable entre mayor sea el tamaño de las burbujas. En esta Fig. se presentan los valores promedio a lo ancho del lecho de las señales de amplitud, y de ellas se ve que al incrementarse la velocidad de fluidización en el sistema abierto muestra un crecimiento en las amplitudes que llega a ser hasta un 30 por ciento mayor que la de los lechos con tubos.

Por otro lado, parece existir poca variación en el promedio de las amplitudes a lo alto de los lechos con tubos. Estos resultados parece corresponder con observaciones reportadas en la literatura sobre un tamaño de burbuja estable resultado de un equilibrio dinámico entre las tasas de coalescencia y rompimiento por impacto con los tubos (Yates y col, 1990; Hull y Agarwal, 1995).

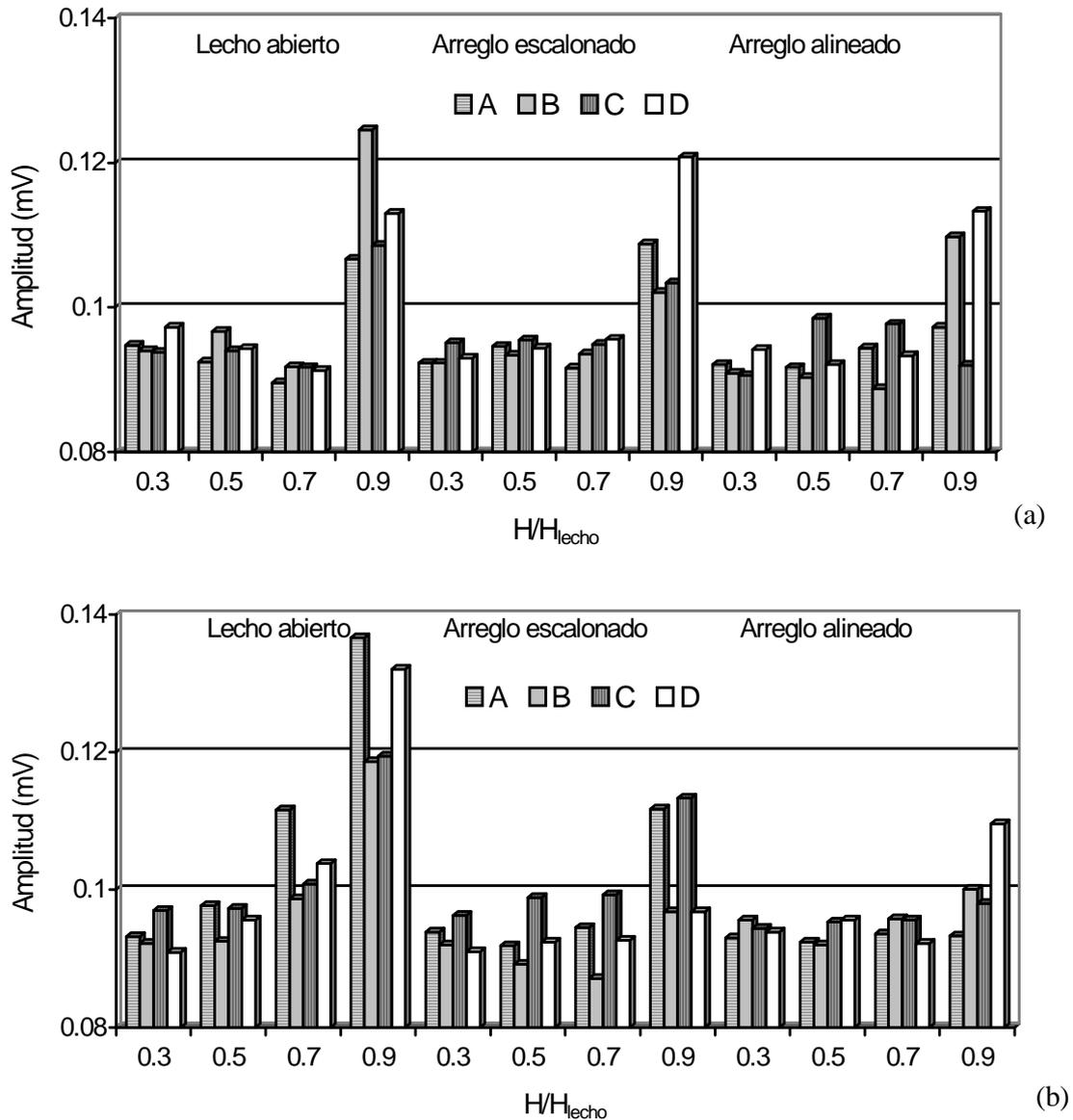


Fig. 8. Distribución de la amplitud de la señal de burbujeo a distintas posiciones en el lecho (A, B, C y D) para sistemas con y sin haz de tubos, a velocidades de (a) $3 U_{mf}$ y (b) $4.5 U_{mf}$.

3.4. Retromezclado del gas

El retromezclado del gas surge en la parte superior del lecho y es originado por el movimiento descendente de los sólidos, el cual compensa al flujo ascendente de éstos al ser arrastrados en las estelas de las burbujas. En la Fig. 10 se presenta la variación de la concentración adimensional del trazador (con respecto a la concentración en el punto de inyección) en función de la posición axial desde la superficie, y a distintas coordenadas transversales. Esta Fig. compara el

retromezclado que se presentó en el lecho abierto y en el lecho con arreglo triangular. Para el lecho abierto a $3 U_{mf}$ se detectó que la concentración adimensional de trazador a una altura cercana a la superficie era, en algunos puntos transversales, de aproximadamente del 50 por ciento, pero en otros tenía valores menores al 5 por ciento. Los puntos transversales de menor retromezclado (posiciones C y D) parecen corresponder a los de una mayor frecuencia de burbujeo, como se reporta en la Fig. 6, lo que indica que las corrientes descendentes de sólidos suceden en rutas de menor

burbujeo. Además, el retromezclado decae rápidamente con la altura desde la superficie del lecho, de manera que para condiciones estudiadas a un 70 por ciento de la altura del lecho apenas y se llegó a detectar trazador. De estas figuras se puede ver que la presencia de tubos modifica radicalmente el retromezclado, reduciendo sustancialmente su penetración o prácticamente eliminándola, como fue el caso para el arreglo alineado de tubos a $3 U_{mf}$. Un aumento en la velocidad superficial muestra un incremento tanto en la intensidad como en la profundidad del retromezclado en ambos lechos, con y sin tubos. Sin embargo, es claro que la presencia de un haz de tubos sigue

manteniendo un retromezclado claramente menor al de un lecho abierto. Estos resultados pueden ser de especial interés en sistemas de reacción con reacciones múltiples, con productos intermedios de interés, cuyo rendimiento se puede ver mermado por el retromezclado presente en un lecho fluidizado abierto. Claramente surge la posibilidad de mejorar el comportamiento del reactor colocando tubos horizontales que sirvan para propósitos de transferencia de calor pero también para mejorar el contacto entre las fases reduciendo el tamaño de burbuja por rompimiento de éstas en el banco y por reducción en el grado de retromezclado del gas.

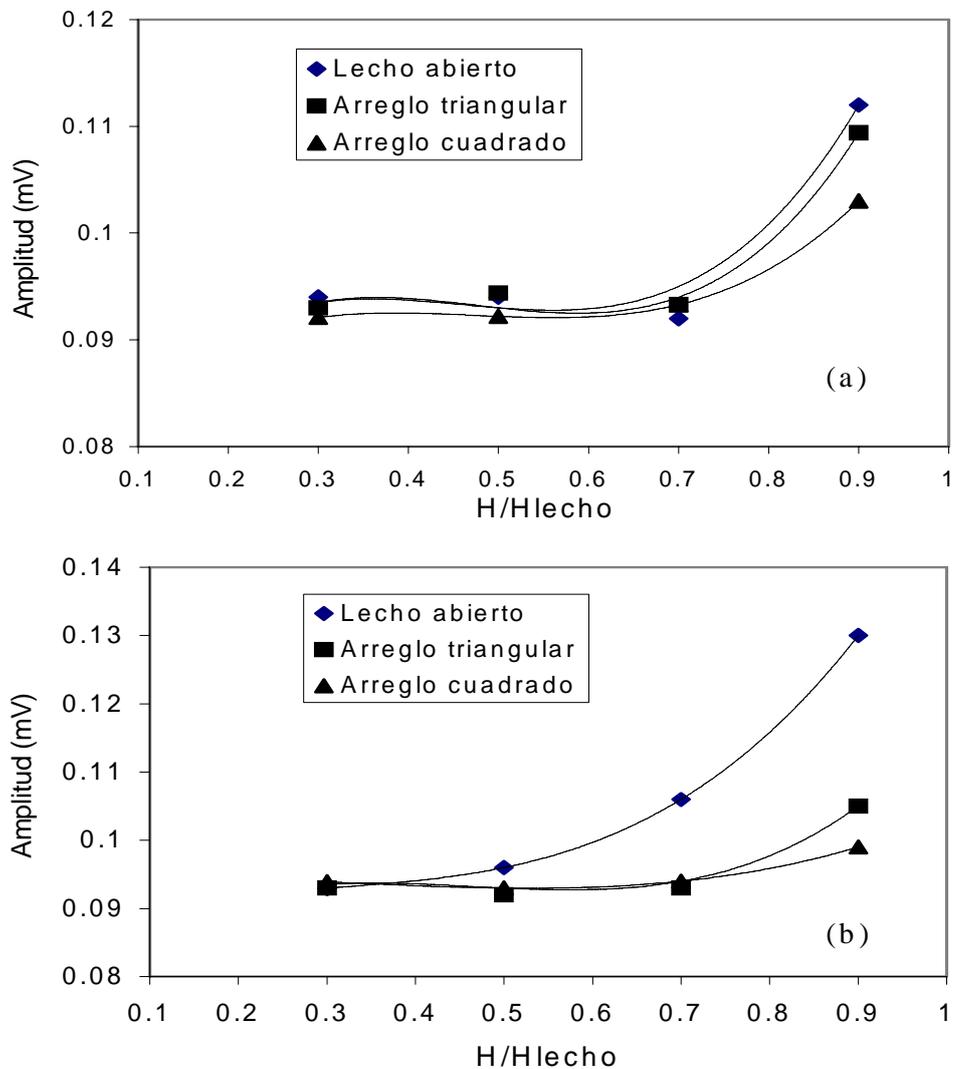


Fig. 9. Variación axial de las amplitud en la señal de burbujeo en función de la altura en el lecho en sistemas sin y con haz de tubos a las velocidades: (a) $3 U_{mf}$ y (b) $4.5 U_{mf}$.

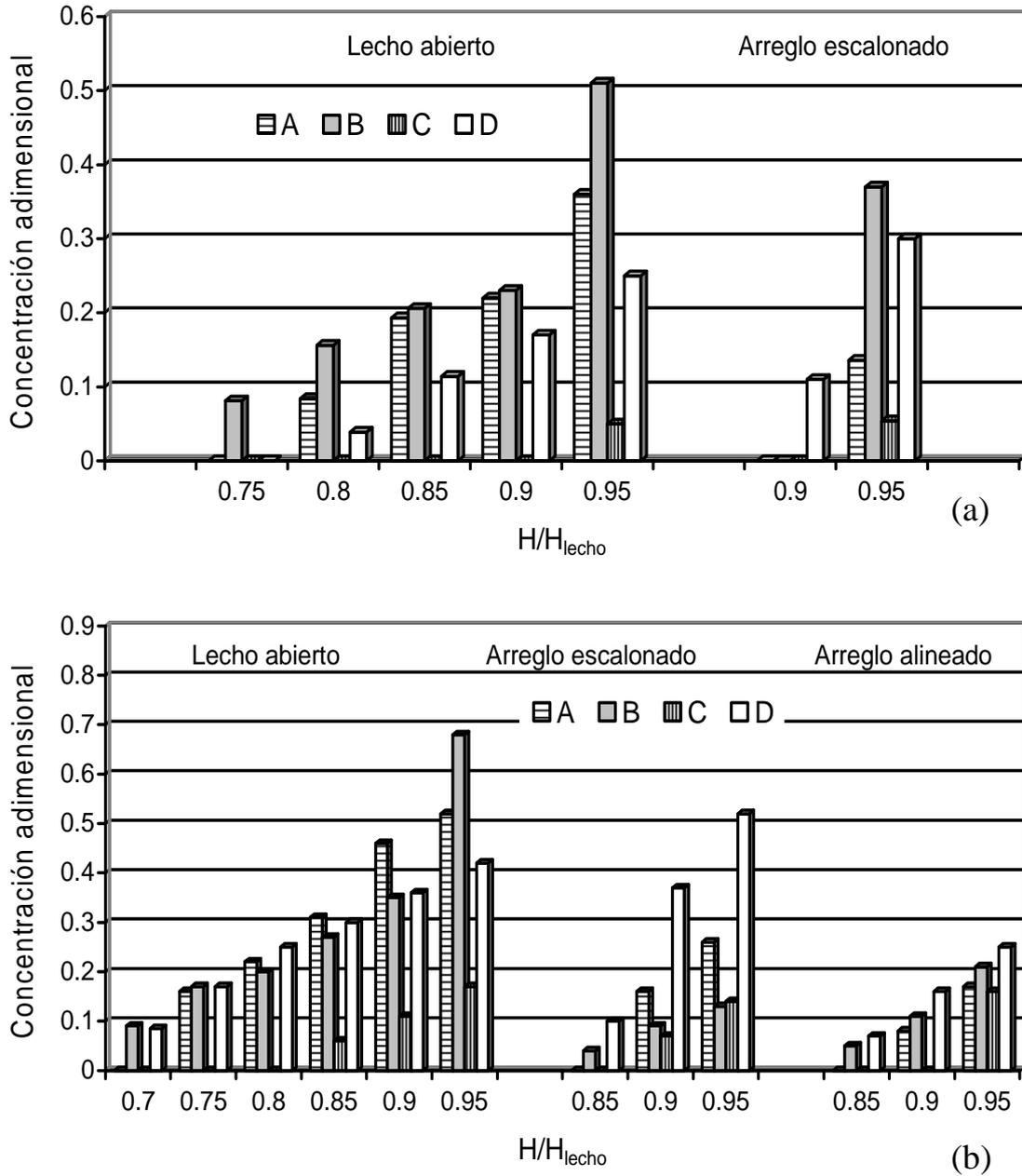


Fig. 10. Concentración adimensional de trazador a distintas posiciones del lecho (zonas A, B, C y D) para el lecho abierto y con tubos a: (a) $3 U_{mf}$, y (b) $4.5 U_{mf}$.

Tabla 1. Valores estimados de la velocidad y diámetro promedios de burbuja y su fracción volumétrica en el lecho para sistemas con arreglos de tubos.

	U/U_{mf}	U_{BS} (m/s)	d_{BV} (m)	ϵ_B
Arreglo alineado	3.0	0.41	0.025	0.07
Arreglo escalonado	4.5	0.43	0.021	0.12
Arreglo alineado	3.0	0.39	0.025	0.08
Arreglo escalonado	4.5	0.37	0.020	0.14

3.5. Cálculo de variables hidrodinámicas del lecho

Los datos de expansión del lecho se han empleado junto con las ecuaciones (2) a (5) para estimar las fracciones volumétricas de burbuja, el diámetro y la velocidad promedios de burbuja en los lechos con tubos, y cuyos valores se presentan en la Tabla 1. De acuerdo a estos resultados, la fracción de burbuja para los dos arreglos de tubos es similar para la velocidad de $3 U/U_{mf}$, lo que sugiere que el efecto de la presencia de tubos a esta velocidad relativamente baja no es muy importante, debido muy probablemente a que las burbujas son de tamaño pequeño en comparación al espacio entre los tubos. Al incrementarse la velocidad de fluidización a $4.5 U/U_{mf}$ la fracción volumétrica de las burbujas crece para los dos arreglos de tubos, siendo ésta ligeramente mayor para el arreglo escalonado. Al parecer dicha diferencia en las fracciones de burbuja en el lecho explica las mayores expansiones observadas experimentalmente en el sistema con el arreglo escalonado de tubos (Fig. 4).

La fracción de la fase burbuja, así como la expansión del lecho, también están relacionados con el tiempo de residencia del gas que viaja en dicha fase. De acuerdo a las Ec. (3), para una velocidad de fluidización dada, entre mayor sea la velocidad de las burbujas menor será la fracción de burbujas retenida en el lecho. A este respecto, la Tabla 1 muestra los valores de las velocidades promedio calculadas, de los cuales se puede ver que para los dos arreglos de tubos existe una dependencia distinta con respecto a la velocidad de fluidización. Es decir, mientras que para el arreglo alineado se predice un aumento en la velocidad promedio de las burbujas con U , para el arreglo escalonado se observa una disminución en la velocidad de las burbujas. Es sabido que la velocidad de las burbujas en un lecho burbujeante es función tanto del tamaño de la burbuja como del efecto de la presencia de las demás burbujas

del enjambre que la acompañan. En lo que a tamaño de burbuja se refiere, en la Tabla 1 se presentan los diámetros de burbuja correspondientes a las velocidades calculadas para los dos arreglos geométricos de tubos, y de ellos es claro que para la misma velocidad de fluidización los diámetros de burbuja son similares para ambos arreglos.

Este resultado sugiere que no es precisamente al efecto del tamaño de burbuja al que se han de atribuir las diferencias entre las velocidades de burbuja de ambos arreglos, sino más bien a un mayor impacto de la existencia de pasos preferenciales de burbujas en el arreglo alineado, y en los que se espera que se concentren y aceleren las burbujas. Esto último se observó experimentalmente con mediciones de frecuencia de burbujeo en las cuales se evidencia zonas transversales del lecho donde se concentra en forma preferencial el flujo de las burbujas (ver Fig. 6).

Es de hacer notar que de acuerdo a los diámetros de burbuja calculados, éstas tienden a mantener un tamaño promedio relativamente constante que es del orden de la distancia entre espacios entre filas verticales de tubos. Estos resultados son congruentes con los resultados experimentales de amplitud de la señal de burbujeo presentados en la Fig. 9, en la que se observa la similitud de los valores para los dos arreglos de tubos. Adicionalmente, los valores calculados del diámetro de burbuja son cualitativamente similares a lo reportado en la literatura para sistemas con tubos horizontales (Kunni y Levenspiel, 1990) con partículas del grupo D de Geldart, y los cuales reportan que el tamaño de las burbujas tiende a estabilizarse en un valor entre 1.0 y 1.5 veces la distancia entre los centros de los tubos.

Conclusiones

Se ha estudiado el efecto de la presencia de un haz de tubos horizontales sobre la hidrodinámica de lechos fluidizados y se ha encontrado que estos

pueden modificar significativamente la distribución espacial de burbujas en el lecho, el tamaño de éstas, y el retromezclado de gas en la fase densa. Bajo las condiciones estudiadas, se encontró que el arreglo escalonado de tubos propició una distribución lateral de burbujas más uniforme que el arreglo alineado, pues al parecer en este último las filas verticales de tubos fungen como barreras que restringen el movimiento lateral de las burbujas; y por ello, puede esperarse que el flujo de burbujas que entra en la base del banco de tubos entre dos filas verticales vecinas sea muy similar al que salga entre las mismas en la parte superior. La geometría del arreglo de tubos también parece afectar la expansión del lecho, pues se encontró que ésta tendía a ser de mayor magnitud para la operación con tubos en arreglo escalonado. Considerando que la expansión se debe básicamente a la fracción volumétrica de la fase burbuja en el lecho, para una misma velocidad de fluidización, y en sistemas donde el tamaño de burbuja es similar, dicha diferencia se puede atribuir principalmente a la presencia de burbujas comparativamente más rápidas en el arreglo alineado. Al parecer esto se favorece debido a que en dicho arreglo geométrico de tubos el área de flujo de las burbujas resulta un tanto más libre que el correspondiente para el arreglo escalonado y, además, por una posible mayor fluidez de la zona densa resultado de la alta concentración de gas entre las filas verticales.

Las velocidades promedio de burbuja calculadas para ambos sistemas de tubos empleando ecuaciones basadas en la teoría de las Dos Fases también tendieron a ser mayores para los sistemas con geometría alineada de tubos. Las mediciones de amplitud de la señal burbujeo sugieren que los bancos de tubos reducen sustancialmente la tasa de crecimiento de las burbujas e inclusive se percibe la tendencia a alcanzar un tamaño constante dentro del arreglo de tubos, el cual parece estar determinado por los espacios entre los tubos; el tamaño de las burbujas resultó ser

similar para los dos arreglos geométricos estudiados. Cabe señalar, que de acuerdo con los resultados arrojados por el modelo empleado, los diámetros promedio se acercan a la distancia horizontal entre las columnas verticales de tubos. Finalmente, ambos arreglos también redujeron significativamente los flujos descendentes de gas en la fase densa del lecho comparadas con las observadas en los sistemas sin tubos, lo que hace interesante su uso en sistemas de reacción que afectan negativamente por la existencia de retromezclado del gas.

Nomenclatura

A	Área de la sección transversal del lecho (m^2)
A_i	Área ocupada por tubos en una fila horizontal (m^2)
d_{BV}	Diámetro equivalente de volumen de una burbuja (m)
g	Constante gravitacional, 9.81 m/s^2
H	Altura promedio del lecho fluidizado a la velocidad de fluidización U (m)
H_{mf}	Altura del lecho fluidizado a la velocidad mínima de fluidización U_{mf} (m)
Q_B	Flujo volumétrico del gas en el lecho (m^3/s)
U	Velocidad superficial del gas (m/s)
U_D	Velocidad superficial en la fase densa (m/s)
U_{mf}	Velocidad mínima de fluidización (m/s)
\overline{U}_{BS}	Velocidad promedio de burbuja en un lecho burbujeante (m/s)
Y	Fracción del flujo de gas correspondiente a $(U-U_{mf})$ que fluye como fase burbuja
ε_B	Fracción del lecho ocupada por burbujas

Referencias

- Baeyens, J., y Geldart, D. (1986). Solids Mixing. En: *Gas Fluidization Technology*, Geldart, D., Ed.; John Wiley & Sons; Chichester, U.K., Capítulo 3, p 104.
- Davidson, J.F. y Harrison, D. (1963). *Fluidised Particles*, Cambridge University Press, Nueva York.

- Deshmukh, S.A.R.K., Volkers, S., Annaland, M. Van Sint, y Kuipers, J.A.M. (2004). Heat transfer in a membrane assisted fluidised bed with immersed horizontal tubes. En: *Fluidization XI* (C. Arena, R. Chirone, M. Miccio, y P.Salatino, eds.), Engineering Conferences International, 291-298.
- Geldart, D. (1973). Types of gas fluidization. *Powder Technology* 7, 285-292.
- Geldart, D. (2004). Expansion of gas fluidized beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 43, 5802-5809.
- Kim, S.W., Ahn, J.Y., Kim, S.D., y Lee, D.H. (2003). Heat transfer and bubble characteristics in a fluidized bed with immersed horizontal tube bundle. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 399-409.
- Kunii, D., y Levenspiel, O. (1990). En: *Fluidization Engineering*, Segunda Edición, Butterworth-Heinemann, Boston, EUA. p 150.
- Hull, A.S., y Agarwal, P.K. (1995). Bubble behaviour in a tube bank: Modeling and experimental investigation using digital image analysis. In: *Fluidization VIII* (C. Laguerie and J.F. Large, eds.), Engineering Foundation, Nueva York 343-350.
- Hull, A.S., Chen, Z., y Agarwal, P.K. (2000). Influence of horizontal tube banks on the behavior of bubbling fluidized beds. 2. Mixing of solids. *Powder Technology* 111, 192-199.
- Lockwood, D.N. (1977). Effects of heat exchanger tube spacing and arrangement on the quality of fluidization. *Proceedings of Pacific Chemical Engineering Congress* 2, 1177-1181.
- Rasouli, S., Golriz, M.R., y Hamidi, A.A. (2005). Effect of annular fins on heat transfer of a horizontal immersed tube in bubbling fluidized beds. *Powder Technology* 154, 9-13.
- Sitnai, O. (1982). Utilization of the pressure differential records from gas fluidized beds with internals for bubble parameter determination. *Chemical Engineering Science* 37, 1059-66.
- Xavier, A. M. y Davidson, J. F. (1981). Heat transfer to surfaces immersed in fluidized beds and in the freeboard region. *American Institution of Chemical Engineering Symposium Series* 77, 368-73.
- Yates, J.G., y Ruiz-Martínez, R.S. (1987). Interaction between horizontal tubes and gas bubbles in a fluidized bed. *Chemical Engineering Communications* 62, 67-78.
- Yates, J.G., Ruiz-Martínez, R.S. y Cheesman, D.J. (1990). Prediction of bubble size in a fluidized bed containing horizontal tubes. *Chemical Engineering Science* 45, 1105-1111.