



ESTUDIO DEL FENÓMENO DE EXPANSIÓN-CONTRACCIÓN DEL LECHO EN REACTORES DE LECHO EBULLENTE USANDO EL ANÁLISIS DIMENSIONAL Y LA TEORÍA DE MODELOS

STUDY OF BED EXPANSION-CONTRACTION PHENOMENON IN EBULLATED-BED REACTORS BASED ON DIMENSIONAL ANALYSIS AND MODEL THEORY

J. L. Sánchez-López¹, R. S. Ruiz-Martínez^{1*}, F. Alonso-Martínez^{2,3} y J. Ancheyta-Juárez²

¹Área de Ingeniería Química, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

Av. San Rafael Atlixco 186, Col. Vicentina, CP 09360, México, D.F.

²Instituto Mexicano del Petróleo; Eje Central Lázaro Cárdenas No. 152

Col. San Bartolo Atepehuaca, México, D.F.

³Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Av. 1o. de Mayo esq. Sor Juana Inés de la Cruz s/n

Col. los Mangos, Cd. Madero Tamaulipas, México.

Recibido 20 de Marzo 2007; Aceptado 18 de Junio 2008

Resumen

Un enfoque acerca del escalamiento hidrodinámico para lechos fluidizados de tres fases reportado por Safoniuk y col. (1999) fue evaluado para sistemas operados a alta presión y alta temperatura. El método mencionado, basado en conceptos de análisis dimensional y teoría de modelos, sugiere el uso de un conjunto de cinco grupos adimensionales que deben ser igualados para asegurar la semejanza hidrodinámica entre dos unidades experimentales separadas que difieren tanto en su geometría como en sus condiciones de operación. Con la ayuda de estos conceptos, en el presente trabajo se llevaron a cabo experimentos en un sistema operado a presión atmosférica para simular el comportamiento hidrodinámico de un sistema de lecho ebullente operado a condiciones severas. La porosidad del lecho y el fenómeno de expansión-contracción fueron comparados en ambos sistemas. Sobre bases estadísticas, se observó una apropiada comparación entre la porosidad del lecho en ambas unidades.

Palabras clave: lecho ebullente, hidrodinámica, escalamiento, semejanza, alta presión.

Abstract

The hydrodynamics scale-up approach reported by Safoniuk *et al.* (1999) for three-phase fluidized beds has been evaluated when applied for high pressure and temperature systems. The aforementioned method, which is based on dimensional analysis concepts and model theory, suggests the use of a set of five dimensionless groups that must be matched to ensure hydrodynamic similarity between two separate experimental units that differ both geometrically and in the operating conditions. With the aid of these concepts, in the present work experiments have been carried out with a system operated at atmospheric pressure to simulate the hydrodynamics of an ebullated-bed system operated under severe conditions. The bed porosity and the bed expansion-contraction phenomena have been compared for both systems. On a statistical basis, a good agreement between the bed porosities of both units was observed.

Keywords: ebullated-bed; hydrodynamics; scale-up; similarity; high pressure.

1. Introducción

El hidrotratamiento de fracciones pesadas del petróleo, tales como residuos atmosférico y de vacío, se ha realizado a través de reactores con tecnologías comerciales de lecho ebullente (*H-Oil* y *LC-Fining*). La aplicación de estos reactores operados a alta presión y alta temperatura se han incrementado en años recientes (Jiang y col., 1997). Sin embargo, existe muy poca información en la literatura abierta

con relación al estudio de su hidrodinámica a condiciones severas de operación y a una particular problemática con relación a su escalamiento.

Como se sabe, un enfoque para el entendimiento de la hidrodinámica de los reactores de lecho ebullente a las condiciones de interés (*alta presión* y *alta temperatura*), es realizando estudios en un equipo a nivel planta piloto para obtener parámetros hidrodinámicos característicos de estos sistemas, y entonces conjuntamente con la

* Autor para la correspondencia. E-mail: rmr@xanum.uam.mx.
Tel.: 5804-4648, Fax.:5804-4900

información cinética y catalítica previa, proceder a estudiar su escalamiento, sin embargo, la operación de estas unidades resulta ser relativamente costosa. Afortunadamente una alternativa económica de estudio para los sistemas de lecho ebullente operados a condiciones severas, es la de obtener información hidrodinámica a nivel laboratorio a partir de sistemas operados a condiciones atmosféricas y temperaturas cercanas a la ambiente, que simulen las condiciones de operación de los sistemas operados a condiciones de alta presión y alta temperatura, empleando conceptos fundamentales de análisis dimensional y teoría de modelos (Sánchez, 2007; Sánchez y col., 2008).

2. Análisis dimensional y teoría de modelos

Para sistemas fluidizados de dos y tres fases, los problemas de escalamiento casi siempre son atribuidos al comportamiento hidrodinámico de los lechos. Para sistemas bifásicos, numerosos trabajos de investigación se han llevado a cabo para resolver este problema. Por ejemplo, Horio y col. (1986) presentan un enfoque para escalar los sistemas bifásicos basado en el adimensionamiento de las ecuaciones gobernantes de la hidrodinámica de tales sistemas, mientras que, por su parte Glicksman y col. (1994) muestran una amplia revisión que perfila el desarrollo y aplicación de las *leyes de escalamiento* para los sistemas de lecho fluidizado bifásicos. Desafortunadamente estudios equivalentes a los anteriores no se han realizado a detalle para estudiar la hidrodinámica de sistemas fluidizados de tres fases, más aun aplicados a sistemas operados a condiciones severas.

Sin embargo, aunque la información existente en la literatura abierta relacionada al estudio del escalamiento aplicado a sistemas trifásicos es muy escasa, en el presente trabajo, se usa la técnica propuesta por Safoniuk y col. (1999) para explorar el comportamiento hidrodinámico global de los sistemas fluidizados de tres fases. Estos investigadores consideran que un enfoque fundamental para escalar la hidrodinámica de los sistemas de tres fases operados a condiciones atmosféricas, es empleando unidades a nivel laboratorio con modelos de flujo en frío, usando conceptos de análisis dimensional, en particular los fundamentos del *Teorema Pi de Buckingham* (Buckingham, 1914). La aplicación de estos conceptos a un conjunto de variables dimensionales que inciden directamente en el comportamiento hidrodinámico de estos sistemas, da como resultado un conjunto de grupos adimensionales característicos que deben coincidir completamente para asegurar la semejanza hidrodinámica entre dos unidades experimentales independientes que difieren tanto en su geometría como en sus condiciones de operación y de flujo.

La identificación de las variables más significativas que pueden influir en el

comportamiento hidrodinámico de los sistemas de lecho fluidizado de tres fases es crucial. Trabajos previos sobre hidrodinámica de lechos de tres fases exponen las variables más significativas que afectan el comportamiento del lecho. Por ejemplo, Bloxom y col. (1975), muestran en una correlación que la retención de gas, ϵ_g , en lechos de tres fases, depende de la densidad del líquido, ρ_l , y de la densidad de los sólidos, ρ_s . Por otra parte Kim y col. (1977) proporcionan correlaciones basadas en datos experimentales que expresan que el diámetro de la burbuja y la proporción de expansión del lecho son función de la velocidad superficial del líquido, U_l , la velocidad superficial del gas, U_g , la viscosidad del líquido, μ_l , y la tensión superficial interfacial, σ . Mientras que la correlación de Meernick y Yuen (1988) muestra que el diámetro de la burbuja tiene una fuerte dependencia del diámetro de la partícula, d_p , y de un término de flotación, $g\Delta\rho$, donde $\Delta\rho$ es la diferencia de densidades entre la fase líquida y la fase gas. Así, a partir de las correlaciones mencionadas anteriormente se han identificado ocho variables dimensionales significativas (U_l , U_g , μ_l , σ , d_p , ρ_l , ρ_s y $g\Delta\rho$) que se espera influyan directamente en la hidrodinámica del lecho.

Usando estas ocho variables dimensionales que involucran tres dimensiones fundamentales (*masa, longitud y tiempo*), pueden formarse cinco grupos adimensionales independientes según el *Teorema Pi de Buckingham*. Estos grupos adimensionales formados no son únicos, pero conscientes de la ventaja e importancia de usar grupos adimensionales que se presentan a menudo en los estudios hidrodinámicos, Safoniuk y col. (1999) proponen los siguientes:

$$M = \frac{g\Delta\rho\mu_l^4}{\rho_l^2\sigma^3}, E_o = \frac{g\Delta\rho d_p^2}{\sigma}, Re_l = \frac{\rho_l d_p U_l}{\mu_l}, \quad (1)$$

$$\beta_d = \frac{\rho_s}{\rho_l} \text{ y } \beta_U = \frac{U_g}{U_l}$$

Además estos investigadores sugieren que en casos en donde la presión es bastante alta, tanto que la densidad del gas es comparable con la densidad del líquido, se debe agregar un sexto grupo adimensional a la lista anterior, $\beta_{dl} = \rho_g/\rho_l$.

Por otro lado, del *Teorema Pi de Buckingham* también se requiere la igualdad de la razón D_c/d_p para las dos unidades independientes, garantizándose así la *semejanza geométrica* entre ambas unidades; este requisito no obstante puede ser relajado para sistemas en donde el diámetro de la partícula es mucho menor al diámetro de la columna ($d_p \ll D_c$, en particular cuando $D_c/d_p > 20$) y/o en donde el diámetro de burbuja es mucho menor que el diámetro de la columna ($d_b \ll D_c$), es decir, en sistemas en donde los efectos significativos de pared pueden ser evitados y/o en sistemas que operan en el régimen de flujo de burbujas dispersas, respectivamente (Macchi y col., 2001). El régimen de burbujas dispersas se caracteriza por la presencia de burbujas pequeñas

con una distribución de tamaños relativamente uniforme (Safoniuk y col., 1999), de tal forma que esto permite en general satisfacer la condición $d_b \ll D_c$. Si no se toman en cuenta estas consideraciones, entonces la semejanza geométrica de las partículas y la columna estrictamente debe mantenerse.

3. Detalles experimentales.

Con la finalidad de verificar la efectividad del enfoque propuesto por Safoniuk y col. (1999), aplicado a sistemas fluidizados de tres fases operados a condiciones diferentes a las que ellos utilizaron, se seleccionó de la literatura un sistema de lecho ebullente operado a alta presión y alta temperatura, empleado por Jiang y col. (1997) para estudiar el fenómeno de *expansión-contracción* del lecho, y que será denotado en lo sucesivo como el *prototipo*. Mientras que para trabajar a nivel laboratorio se cuenta para el presente trabajo con un sistema de lecho fluidizado trifásico operado a condiciones atmosféricas y temperaturas cercanas a la ambiente, identificado como el *modelo* y que nos permite simular las condiciones de operación y de flujo del *prototipo*.

Los grupos adimensionales de la Ec. (1) determinados para el *prototipo* a cada condición de operación y de flujo seleccionada para las simulaciones experimentales, deben ser igualados con los grupos correspondientes derivados para el *modelo*, a esta acción la denotaremos en lo sucesivo simplemente como *igualación*. Estas igualaciones efectuadas, establecen consecuentemente las condiciones de operación y de flujo en el *modelo* que nos permiten simular las respectivas condiciones de operación y de flujo en el *prototipo*, además de que se pueden determinar los principales parámetros hidrodinámicos en el *modelo*, en particular la porosidad del lecho. Así, la porosidad del lecho puede ser comparada entre las dos unidades experimentales independientes.

3.1. Definición de los sistemas experimentales

Prototipo: Es el sistema de tres fases y equipo experimental empleado por Jiang y col., (1997) para sus trabajos de investigación. Este sistema está constituido por un fluido de transferencia térmica de tipo comercial *Paratherm NF*, nitrógeno y partículas esféricas de vidrio de 1.0 mm de diámetro, empleados como la fase líquida, gas y sólida, respectivamente. El aparato de prueba incluye una columna vertical, un tanque de precalentamiento del líquido, un calentador de gas, un sistema de control de presión, un sistema de control de temperatura y un sistema de separación *gas-líquido*. La mezcla *gas-líquido* es introducida al lecho a través de un distribuidor. La columna cilíndrica vertical está construida de acero inoxidable y tiene una altura de 80 cm y un diámetro interno de 5.08 cm. Los detalles

del aparato de prueba se encuentran reportados en el trabajo publicado por Jiang y col., (1997).

Modelo: Es el sistema de tres fases formado por gasóleo ligero primario (*GLP*), nitrógeno y partículas esféricas de vidrio de 1.0 mm de diámetro. En la Fig. 1 se presenta el equipo del sistema experimental en frío en forma esquematizada. Este equipo consta principalmente de una columna de vidrio con una altura de 140 cm y un diámetro interno de 10 cm. La columna contiene a lo alto una serie de 12 tomas de presión alineadas y espaciadas 7.5 cm una de otra, estando la primera a 9.5 cm por arriba del plato distribuidor. En la base de la columna se tiene un plato multiperforado de aluminio que sirve como distribuidor de los flujos alimentados de gas y líquido. El líquido se calienta previamente mediante un sistema de control de temperatura situado a la entrada de la columna. Tanto el flujo de líquido como el de gas son medidos con rotámetros previamente a su introducción al lecho. En la parte superior de la columna el flujo de líquido se regresa a un tanque de almacenamiento de donde se vuelve a bombear el flujo deseado a la columna. El gas se separa del líquido en la parte superior de la columna, lugar donde se ventea a la atmósfera.

3.2. Formación de grupos adimensionales

Las condiciones de operación seleccionadas para el *prototipo*, así como las propiedades físicas de los fluidos y de las partículas a estas condiciones, se encuentran reportadas en la Tabla 1, aquí podemos ver el resultado de los cinco grupos adimensionales obtenidos a partir de las propiedades físicas de los fluidos, de las partículas y de los regímenes de flujo para el gas y para el líquido correspondientes a cada condición de operación seleccionada del trabajo de Jiang y col. (1997). En la Tabla 2 se describen las propiedades físicas de los fluidos y de las partículas para cada condición de operación y de flujo derivada de las igualaciones efectuadas, así como los grupos adimensionales resultantes para el *modelo*.

Las propiedades de los fluidos y de las partículas sólidas para el *modelo* fueron determinados experimentalmente. Las propiedades físicas del *GLP* se obtuvieron siguiendo los métodos *ASTM-D-70*, *ASTM-D-455* y *ASTM-D-971*, para determinar su densidad, su viscosidad cinemática y su tensión superficial, respectivamente, a varias temperaturas y presión atmosférica (aproximadamente 0.08 MPa). Para obtener la densidad del N_2 a las condiciones de operación de interés se consultó la base de datos de referencia del National Institute of Standards and Technology, [en línea, 2006]. Finalmente la densidad de las partículas esféricas de vidrio de 1.0 mm, fue determinada empleando el método *ASTM-C-128*.

Tabla 1. Propiedades físicas de los fluidos y sólidos para el *prototipo*, con los resultados de los grupos adimensionales a varias condiciones de operación (Jiang y col., 1997a).

Propiedades y grupos adimensionales	Prototipo			
	1.80	3.5	7.24	14.18
Presión, p (MPa)	1.80	3.5	7.24	14.18
Temperatura, T (°C)	90	90	90	90
Diámetro de la columna, D _c (m)	0.0508	0.0508	0.0508	0.0508
Densidad del líquido, ρ _l (kg/m ³)	846.21	849.94	857.30	867.84
Viscosidad del líquido, μ _l (Pa·s)	0.003646	0.003723	0.003809	0.003890
Velocidad del líquido, U _l (m/s)	0.0024 y 0.0045	0.0047 y 0.0068	0.0025	0.0039
Densidad de la partícula, ρ _s (kg/m ³)	2552	2552	2552	2552
Diámetro de la partícula, d _p (m)	0.001	0.001	0.001	0.001
Densidad del gas, ρ _g (kg/m ³)	16.64	32.22	65.87	125.15
Velocidad del gas, U _g (m/s)	0 – 0.0475 y 0 – 0.045	0 – 0.0375 y 0 – 0.035	0 – 0.04	0 – 0.03
Tensión superficial líquido, σ (N/m)	0.023939	0.022880	0.021002	0.019239
No. Morton (M)	1.46 x 10 ⁻⁷	1.78 x 10 ⁻⁷	2.40 x 10 ⁻⁷	3.11 x 10 ⁻⁷
No. Eötvös (E _o)	0.3400	0.3506	0.3697	0.3787
No. Reynolds del líquido (Re _l)	0.56 y 1.04	1.07 y 1.55	0.56	0.87
Razón de densidades (β _d)	3.0158	3.0026	2.9768	2.9407
Razón de velocidades (β _v)	0 – 19.792 y 0 – 10	0 – 7.979 y 0 – 5.147	0 – 16	0 – 7.692
Razón D _c /d _p	50.8	50.8	50.8	50.8

Tabla 2. Propiedades físicas de los fluidos y sólidos para el *modelo*, con los resultados de los grupos adimensionales a varias condiciones de operación.

Propiedades y grupos adimensionales	Modelo			
	0.08	0.08	0.08	0.08
Presión, p (MPa)	0.08	0.08	0.08	0.08
Temperatura, T (°C)	24	23	23	22
Diámetro de la columna, D _c (m)	0.1	0.1	0.1	0.1
Densidad del líquido, ρ _l (kg/m ³)	859.78	860.55	860.55	861.33
Viscosidad del líquido, μ _l (Pa·s)	0.004530	0.004987	0.004987	0.005514
Velocidad del líquido, U _l (m/s)	0.0029 y 0.0055	0.0062 y 0.0090	0.0033	0.0056
Densidad de la partícula, ρ _s (kg/m ³)	2504	2504	2504	2504
Diámetro de la partícula, d _p (m)	0.001	0.001	0.001	0.001
Densidad del gas, ρ _g (kg/m ³)	0.8738	0.8776	0.8776	0.8815
Velocidad del gas, U _g (m/s)	0 – 0.0581 y 0 – 0.055	0 – 0.0496 y 0 – 0.0463	0 – 0.0522	0 – 0.0428
Tensión superficial líquido, σ (N/m)	0.032200	0.032400	0.032400	0.032600
No. Morton (M)	1.44 x 10 ⁻⁷	2.07 x 10 ⁻⁷	2.07 x 10 ⁻⁷	3.04 x 10 ⁻⁷
No. Eötvös (E _o)	0.2617	0.2603	0.2603	0.2589
No. Reynolds del líquido (Re _l)	5.57 x 10 ⁻¹ y 1.04	1.07 y 1.55	5.63 x 10 ⁻¹	8.70 x 10 ⁻¹
Razón de densidades (β _d)	2.9124	2.9098	2.9098	2.9071
Razón de velocidades (β _v)	0 – 19.792 y 0 – 10	0 – 7.979 y 0 – 5.147	0 – 16	0 – 7.692
Razón D _c /d _p	100	100	100	100

3.3. Igualación de grupos adimensionales.

En la Tabla 3 se muestran las *igualaciones* obtenidas a varias condiciones de operación y de flujo, y como se observa los sistemas seleccionados no producen una perfecta igualación de los grupos adimensionales. Sin embargo, se considera que las igualaciones son aceptables, sobre todo dado que hay una incertidumbre considerable en las dimensiones precisas de las propiedades de los fluidos a las condiciones de operación de interés usadas en el *prototipo*. Las diferencias entre los grupos adimensionales para todas las igualaciones presentadas, se dan principalmente para el *número de Morton* (M), *número de Eötvös* (E_o) y razón de

densidades (β_d). Los grupos adimensionales M y E_o, están integrados principalmente por variables dimensionales que cuantifican las propiedades físicas tanto para los fluidos, como para las partículas, y son grupos adimensionales que conjuntamente con el *número Reynolds* del líquido (Re_l) permiten físicamente caracterizar la forma, tamaño y movimiento de las burbujas (Davidson y Harrison, 1963).

Por otra parte la razón D_c/d_p no pudo igualarse completamente entre ambos sistemas independientes, sin embargo los valores obtenidos para esta razón nos indican que para las partículas usadas en éstos, el diámetro de la columna fue más de 20 veces mayor que el diámetro de la partícula (es

Tabla 3. Igualación de grupos adimensionales a varias condiciones de operación.

Grupos Adimensionales	Igualación 1		Igualación 2	
	Prototipo p = 1.80 MPa T = 90 °C	Modelo p = 0.08 MPa T = 24 °C	Prototipo p = 3.5 MPa T = 90 °C	Modelo p = 0.08 MPa T = 23 °C
No. Morton (M)	1.46 x 10 ⁻⁷	1.44 x 10 ⁻⁷	1.78 x 10 ⁻⁷	2.07 x 10 ⁻⁷
No. Eötvös (E _o)	0.3400	0.2617	0.3506	0.2603
No. Reynolds (Re _l)	0.56 y 1.04	0.56 y 1.04	1.07 y 1.55	1.07 y 1.55
Razón de densidades (β _d)	3.0158	2.9124	3.0026	2.9098
Razón de velocidades (β _U)	0 - 19.792 y 0 - 10	0 - 19.792 y 0 - 10	0 - 7.979 y 0 - 5.147	0 - 7.979 y 0 - 5.147
Razón: D _c /d _p	50.8	100	50.8	100

Grupos Adimensionales	Igualación 3		Igualación 4	
	Prototipo p = 7.24 MPa T = 90 °C	Modelo p = 0.08 MPa T = 23 °C	Prototipo p = 14.18 MPa T = 90 °C	Modelo p = 0.08 MPa T = 22 °C
No. Morton (M)	2.40 x 10 ⁻⁷	2.07 x 10 ⁻⁷	3.11 x 10 ⁻⁷	3.04 x 10 ⁻⁷
No. Eötvös (E _o)	0.3697	0.2603	0.3787	0.2589
No. Reynolds (Re _l)	0.56	0.56	0.87	0.87
Razón de densidades (β _d)	2.9768	2.9098	2.9407	2.9071
Razón de velocidades (β _U)	0 - 16	0 - 16	0 - 7.692	0 - 7.692
Razón: D _c /d _p	50.8	100	50.8	100

decir d_p « D_c), minimizándose así los efectos de pared y relajando así el requisito estricto de semejanza geométrica (Macchi y col. 2001).

3.4. Medición de la fracción volumen usando manómetros diferenciales.

Como se puede ver a partir de la Fig. 1, en el modelo se colocaron medidores manométricos diferenciales de presión a lo largo de la columna, estos se conectaron a las tomas de presión ubicadas a varias distancias (9.5, 17.0, 24.5, 32.0, 39.5, 47.0, 54.5, 62.0, 69.5, 77.0, 84.5 y 92.0 cm) sobre el plato distribuidor. De esta forma se registraron las caídas de presión a lo largo de la columna, para cada evento experimental llevado a cabo en el modelo.

La caída de presión a través del lecho está relacionada a la retención de fases individuales, de esta forma a condiciones de estado estable y considerando una baja o moderada velocidad de líquido y gas, las retenciones de fases en un lecho fluidizado trifásico pueden ser determinadas a partir de las caídas axiales de presión total moderadas (caída de presión estática), empleando la ecuación

$$\frac{\Delta p}{\Delta z} = (\epsilon_g \rho_g + \epsilon_l \rho_l + \epsilon_s \rho_s) g \quad (2)$$

donde ε_g, ε_l y ε_s son las retenciones o fracciones volumen del gas, líquido y sólido, respectivamente. En esta ecuación el arrastre friccional sobre la pared de la columna y el término de aceleración para el flujo de gas y el líquido son omitidos. En ocasiones la contribución de la densidad de la fase gas es usualmente despreciable comparada con los otros términos, por lo que la Ec. (2) puede simplificarse como

$$\frac{\Delta p}{\Delta z} = (\epsilon_l \rho_l + \epsilon_s \rho_s) g \quad (3)$$

En los lechos fluidizados (con baja proporción de entrada de sólidos en la región diluida del lecho) la retención de sólidos en el lecho se estima por la altura efectiva del lecho expandido, H, y por los sólidos totales inventariados en el lecho, W_s, es decir,

$$\epsilon_s = 1 - \epsilon = \frac{W_s}{\rho_s A H} \quad (4)$$

donde A es el área de seccional transversal del lecho y ε es la porosidad o fracción vacía del lecho. Como podemos ver de la ecuación anterior la porosidad del lecho está relacionada a la expansión o contracción del lecho. Es importante hacer notar que la suma de

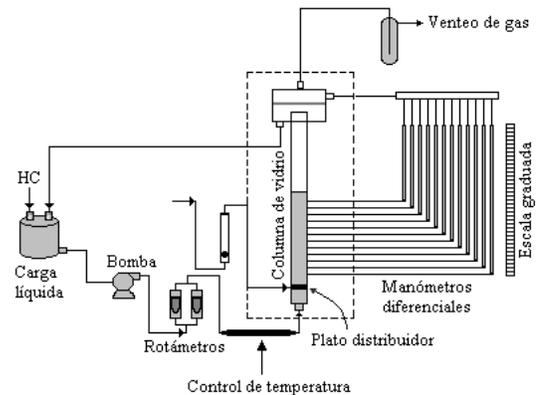


Fig. 1. Esquema simplificado del equipo experimental en frío para simular la operación del sistema experimental a alta presión y alta temperatura.

las tres retenciones de fases resultan ser la unidad, de esta forma se puede escribir

$$\varepsilon_g + \varepsilon_l + \varepsilon_s = 1 \quad (5)$$

Las tres retenciones de fases desconocidas pueden calcularse a partir de las ecuaciones anteriores (2) - (5). La altura del lecho expandido, se puede obtener por medio de la intersección de las líneas de regresión de las caídas de presión axial de la zona densa y de la zona diluida del lecho (Macchi y col. 2001).

4. Resultados experimentales y discusión

La porosidad del lecho está intrínsecamente relacionada a la expansión o contracción del lecho mediante la Ec. (4). En las figs. 2 - 5, se muestra graficada la porosidad del lecho ($\varepsilon = 1 - \varepsilon_s$), contra el número de Reynolds del gas modificado (*Re_g), producto del Re_l con β_U (parámetro así definido por Safoniuk y col., 1999 y empleado también por Macchi y col., 2001), para un valor dado del número de Reynolds del líquido (Re_l) a las condiciones de operación dadas para ambos sistemas correspondientes a las igualaciones presentadas en la Tabla 3.

Los resultados de la porosidad del lecho correspondientes a la *igualación 1* se muestran en las figs. 2a y 2b, para los Reynolds del líquido de 0.56 y 1.04, respectivamente. Bajo las condiciones de operación y de flujo presentadas en la gráfica de la Fig. 2a podemos apreciar que la porosidad del lecho para el caso del *modelo* es mayor que la del *prototipo*, sobre todo a *Re_g altos, además de que sólo en el *modelo* es posible observar el fenómeno de contracción del lecho. La contracción del lecho para el *modelo* sucede a las condiciones adimensionales de flujo de $Re_l = 0.56$ y $^*Re_g = 0.58$. Para el caso mostrado en la Fig. 2 (b) podemos ver que también la porosidad del lecho en el *modelo* es mayor que la del *prototipo*, particularmente a *Re_g altos. Aquí podemos distinguir claramente el fenómeno de contracción del lecho para ambos sistemas experimentales, el cual ocurre para el *prototipo* a las condiciones adimensionales de flujo de $Re_l = 1.04$ y $^*Re_g = 2.90$. Mientras que para el *modelo* la contracción del lecho ocurre a un $Re_l = 1.04$ y $^*Re_g = 0.58$.

Para la *igualación 2*, los resultados de la porosidad del lecho se muestran en las Figs. 3 (a) y 3 (b), para los Reynolds del líquido de 1.07 y 1.55, respectivamente. De estas figuras podemos ver correspondientemente que en el *prototipo* se presenta una ligera contracción del lecho cuando operamos a $Re_l = 1.07$ y $^*Re_g = 1.71$, mientras que es más notable cuando se tiene un $Re_l = 1.55$ y $^*Re_g = 1.14$. Para el *modelo* cuando el $Re_l = 1.07$ el fenómeno de contracción del lecho no se observa, pero cuando el $Re_l = 1.55$ se observa una ligera contracción del lecho a un $^*Re_g = 1.14$. Para el caso de esta igualación, tenemos que el valor de la porosidad del

lecho para los mismos valores del *Re_g en ambos sistemas, en general es siempre mayor en el *modelo* para ambos valores del número de Re_l dados, y la tendencias de la porosidad del lecho en ambos sistemas divergen sobre todo a valores de *Re_g altos.

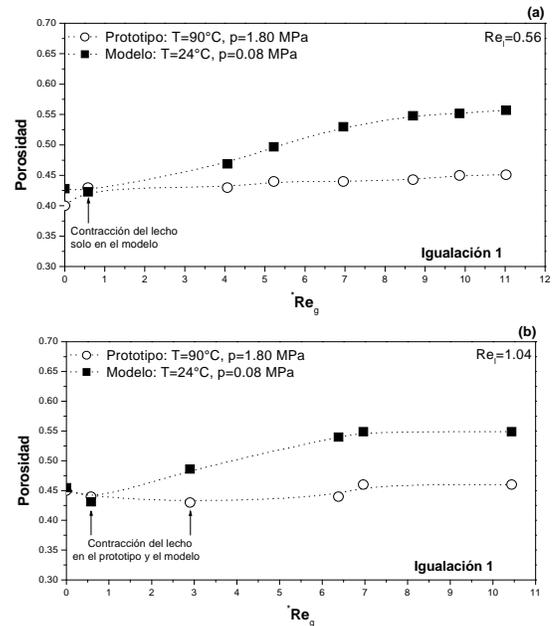


Fig. 2. Porosidad del lecho (ε) versus número de Reynolds del gas modificado (*Re_g) para ambos sistemas correspondiente a la *igualación 1*, para: (a) $Re_l = 0.56$ y (b) $Re_l = 1.04$.

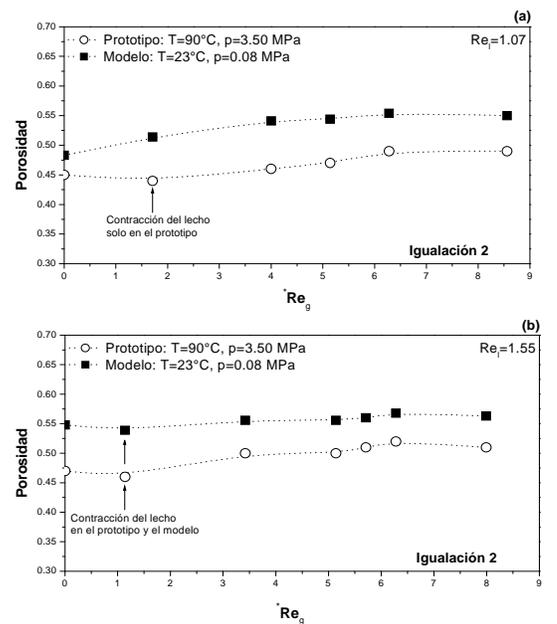


Fig. 3. Porosidad del lecho (ε) versus número de Reynolds del gas modificado (*Re_g) para ambos sistemas correspondiente a la *igualación 2*, para: (a) $Re_l = 1.07$ y (b) $Re_l = 1.55$.

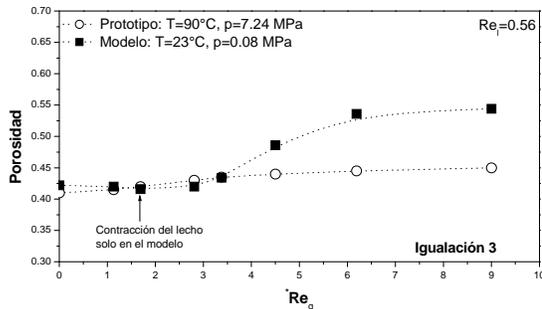


Fig. 4. Porosidad del lecho (ϵ) versus número de Reynolds del gas modificado (*Re_g) para ambos sistemas correspondiente a la igualdad 3, para $Re_l = 0.56$.

Por lo que concierne a la igualdad 3 mostrada en la Fig. 4, a las condiciones de operación dadas, podemos apreciar que para los mismos valores del *Re_g en ambos sistemas, la porosidad del lecho es prácticamente igual cuando operamos a valores de $0 \leq ^*Re_g < 2.81$ aproximadamente, sin embargo bajo las mismas condiciones para el caso en que operamos a valores $2.81 \leq ^*Re_g \leq 9.00$, la porosidad del lecho es siempre mayor en el modelo. El fenómeno de contracción del lecho sólo se presentó para el modelo a las condiciones adimensionales de flujo de $Re_l = 0.56$ y $^*Re_g = 1.69$.

Finalmente de la Fig. 5 correspondiente a la igualdad 4, podemos observar que para los mismos valores del *Re_g en ambos sistemas, a un valor de $Re_l = 0.87$ dado, la porosidad del lecho es mayor para el modelo, sobre todo cuando operamos a *Re_g altos. A estas condiciones de operación y de flujo, encontramos a su vez que para ambos sistemas experimentales, no se presentó el fenómeno de contracción del lecho. Finalmente cabe mencionar que en general para todas las igualaciones analizadas, la porosidad del lecho en el modelo fue sistemáticamente mayor que en el prototipo, esta diferencia en general es de alrededor del 12.58%, en promedio.

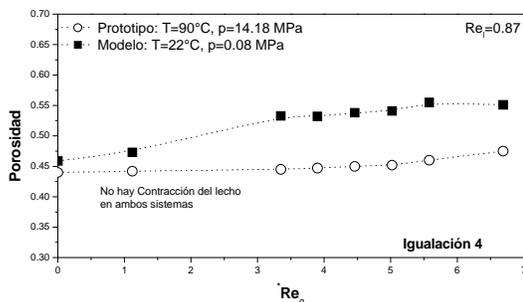


Fig. 5. Porosidad del lecho (ϵ) versus número de Reynolds del gas modificado (*Re_g) para ambos sistemas correspondiente a la igualdad 4, para $Re_l = 0.87$.

Como se sabe, en sistemas operados a condiciones ambiente, a una velocidad del líquido

dada, la porosidad del lecho puede disminuir, con la introducción de la fase gas o aumentar, dependiendo del patrón de flujo de burbujas. Para un lecho fluidizado de tres fases de partículas pequeñas operado bajo condiciones ambiente a una velocidad de gas dada, la expansión del lecho se incrementa fuertemente con un aumento en la velocidad del líquido y/o un incremento en la viscosidad del líquido, mientras que la expansión del lecho con respecto a la velocidad del gas es ligera. Por otro lado la variación en la temperatura y/o presión puede afectar tanto las propiedades físicas del líquido como las propiedades interfaciales gas-líquido, alterándose las características hidrodinámicas del lecho, principalmente la expansión de éste. Así, una disminución en la temperatura incrementa la viscosidad del líquido, la cual a su vez aumenta la fuerza de arrastre sobre las partículas, mientras que un incremento en la densidad del líquido, aumenta la fuerza ascensional en las partículas. Por lo que respecta a la presión, un incremento en ésta aumenta la viscosidad y la densidad del líquido. La disminución en una de estas dos propiedades físicas del líquido conduce a una disminución en la porosidad del lecho. En lechos ebullicentes operados a condiciones severas pueden ocurrir tanto la expansión como la contracción del lecho tal como ocurre en los sistemas operados a condiciones ambiente (Jiang y col., 1997; Luo y col., 1997).

Claramente para el modelo, los resultados de la porosidad del lecho obtenidos para cada condición de operación por separado están de acuerdo con los resultados previamente reportados por Jiang y col. (1997) y Luo y col. (1997), mostrando que para una velocidad del flujo de líquido dada, y de aquí del Re_l , hay una dependencia muy débil con respecto a la velocidad de flujo de gas, y por consiguiente del *Re_g , mientras que la expansión del lecho depende fuertemente de la velocidad del líquido (o de la viscosidad del líquido), a una velocidad del gas dada. Para el caso del prototipo es evidente a partir del propio trabajo de Jiang y col. (1997), un resultado semejante, pues la porosidad del lecho se incrementa a medida que aumentamos el Re_l y el *Re_g .

Los lechos fluidizados de tres fases operados a relativamente bajas velocidades de gas y líquido tienden a contener burbujas pequeñas con una distribución del tamaño de burbujas estrecha (Zhang y col., 1997). Cuando la velocidad del gas se incrementa, son encontradas burbujas más grandes con una distribución del tamaño de burbuja más amplia. Con un incremento en la población de burbujas, disminuye la distancia entre estas, lo cual favorece su coalescencia, tal comportamiento global del lecho es referido como flujo de burbujas en coalescencia. Por otra parte, cuando el flujo de líquido es aumentado a una velocidad constante del flujo de gas, las burbujas llegan a ser pequeñas con una distribución de tamaños estrecha, este régimen de flujo es conocido como régimen de flujo de burbujas dispersas.

Las diferencias sistemáticas que existen en general en las tendencias de la porosidad del lecho y la divergencia entre los valores de porosidad del lecho con respecto a los aumentos del Re_g en ambos sistemas analizados, para todas las igualaciones, pueden ser atribuidas en principio a una alta proporción de coalescencia de las burbujas en los fluidos empleados en la operación del *modelo* tal como se visualizó directamente de los experimentos llevados a cabo (Sánchez, 2007; Sánchez y col., 2008), ya que un incremento en la velocidad del gas condujo a un incremento del número de burbujas grandes, y de aquí que podamos ver a partir de las figs. 2 - 5 que la coalescencia de las burbujas es más alta para el *modelo* sobre todo a Re_g altos. Además de que para el *prototipo* a las condiciones de operación mostradas, la presencia de burbujas más pequeñas en el lecho y la viscosidad menor de la fase líquida, están entre las razones principales que explican tales diferencias en la porosidad del lecho. Un incremento ligero en la porosidad del lecho con la velocidad del gas para el *prototipo* a una velocidad de líquido dada, tal como se observa las figs. 2 - 5, es típico de los sistemas fluidizados bajo el así llamado régimen de flujo de burbujas dispersas.

Aunque los grupos adimensionales no se igualaron exactamente para el conjunto de experimentos presentados, la semejanza en las tendencias desde el punto de vista cualitativo para todos los casos es alentadora. Resulta notable que a Re_g bajos las diferencias entre los valores de porosidad se reducen, mientras que a Re_g más altos las tendencias difieren considerablemente, esto debido a que particularmente en el *modelo*, a Re_g bajos nos encontramos en el régimen de burbujas dispersas y a Re_g altos nos encontramos en el régimen de burbujas en coalescencia, tal como se visualizó directamente en la columna de vidrio, no obstante, este hecho podría ser verificado cuantitativamente mediante un análisis del flux de arrastre del gas, lo que nos permitiría identificar el tipo de régimen de flujo con mayor certeza, mientras que en el *prototipo*, el régimen predominante es el de burbujas dispersas tal como lo reportan Jiang y col. (1997).

En general se presentan resultados cualitativamente similares para el fenómeno de *expansión-contracción* del lecho entre los sistemas igualados con la introducción del gas. En el *prototipo* se aprecia una ligera contracción del lecho la cual disminuye con el aumento de la presión y tiende a desaparecer a presiones superiores a los 8 MPa. Mientras que para el *modelo* cuando se simuló a la presión de operación más baja, se observó claramente la contracción del lecho con la introducción inicial del gas dentro del sistema fluidizado *líquido-sólido*, mientras que a la presión más alta, la contracción también desaparece. Específicamente en el *prototipo* a las presiones de 1.80 y 14.18 MPa (figs. 2 y 5, respectivamente), se aprecia que los efectos de presión sobre la

contracción del lecho son significativamente diferentes, observándose que la contracción del lecho es mucho menos pronunciada bajo altas presiones y tiende a desaparecer, mientras que la velocidad del gas correspondiente a la mínima altura del lecho reflejada por la porosidad disminuye con un incremento en la presión. Por otro lado podemos observar de las figs. 2 - 5, que para el *prototipo* se presenta un incremento en la porosidad del lecho a medida que se incrementa la presión del sistema, lo cual incrementa la viscosidad del líquido empleado, mientras que para el *modelo* este parámetro hidrodinámico tiende a aumentar cuando se disminuye la temperatura, ya que al disminuir la temperatura del sistema se incrementa la viscosidad del fluido utilizado.

Así bien, para el caso del *modelo* a la presión fija de 0.08 MPa, el fenómeno de contracción del lecho puede ser analizado a partir de los efectos de temperatura. Como podemos ver comparativamente a partir de las figs. 2 y 5, la disminución de temperatura de 24 a 22° C produce cualitativamente un efecto semejante al producido por el aumento de presión en el *prototipo* sobre el fenómeno de contracción. Asimismo se puede ver también que la porosidad (o altura del lecho) para el *prototipo*, aumenta cuando se aumenta la presión de operación de 1.8 a 14.18 MPa. De lo anterior se parece desprender el hecho de que la simulación en la operación del sistema fluidizado a alta presión y alta temperatura, se puede llevar a cabo con un sistema en frío, controlando las principales propiedades físicas de los fluidos en función de la temperatura, de forma tal que se logren valores adecuados para estas propiedades, que nos permitan establecer un adecuada igualación de los grupos adimensionales para ambos sistemas.

4.1. Análisis de dispersión de datos

Un análisis de dispersión de datos experimentales (porosidad del lecho como parámetro hidrodinámico de control), nos permite estadísticamente obtener el nivel de semejanza de éstos. Las diferencias estadísticas pueden caracterizarse *cuantitativamente* por medio de la raíz cuadrada de la *desviación cuadrática media* (RMSD, *Root Mean Square Deviation*) y del factor de sesgado (Fm) mediante las siguientes ecuaciones:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{Modelo - Prototipo}{Prototipo} \right)^2} \quad (6)$$

$$Fm = \exp \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \ln(Prototipo/Modelo) \right] \quad (7)$$

donde k es el número de eventos experimentales y, *Prototipo* y *Modelo* se refieren al valor correspondiente del parámetro hidrodinámico en cuestión, para el *prototipo* y el *modelo*, respectivamente, y del que deseamos comparativamente saber su grado de dispersión,

tomando como referencia al *prototipo*. El análisis de dispersión es una primera aproximación cuantitativa que nos permite establecer el *nivel de semejanza hidrodinámica* alcanzado en cada igualación.

En la Tabla 4 se presentan estas cantidades para cada igualación. Aquí podemos ver como los datos experimentales se sesgan ligeramente ($0.865 < F_m < 0.942$), mientras que la RMSD es del orden del 15 %. Con la observación cualitativa de los resultados de la porosidad del lecho para cada emparejamiento y con el análisis de dispersión de datos, podemos inferir que la semejanza hidrodinámica se aproxima por lo menos bajo las condiciones de operación del régimen de burbujas dispersas cubiertas, es decir a Re_g bajos, lo que nos proporcionan una estimación de ingeniería razonable de la caracterización hidrodinámica global, para el escalamiento de este parámetro hidrodinámico. Sin embargo, el enfoque de la semejanza hidrodinámica no puede ser apropiado para determinar información microscópica y de los modelos de flujo locales, esto debido principalmente a las diferencias en las tendencias de la porosidad atribuidas probablemente a la compleja naturaleza de la coalescencia de las burbujas para ambos sistemas. Si las soluciones líquidas empleadas hubieran entrado en el régimen espumante, la desigualdad probablemente habría sido mayor. De tal forma se sugiere para estudios futuros, caracterizar e identificar el fenómeno de coalescencia y espumado entre los fluidos empleados para cada sistema experimental.

Tabla 4. RMSD y F_m para la porosidad del lecho entre los dos sistemas.

Porosidad	Re_l	RMSD	F_m
Igualación 1	0.56	0.171	0.875
	1.04	0.155	0.894
Igualación 2	1.07	0.142	0.879
	1.55	0.126	0.891
Igualación 3	0.56	0.111	0.942
Igualación 4	0.87	0.168	0.865
Global	-	0.148	0.891

Conclusiones.

A pesar de que existen diferencias contrastantes entre el sistema en frío y el sistema a alta presión y alta temperatura investigado por Jiang y col. (1997), se realizaron esfuerzos para hacer coincidir todos los grupos adimensionales derivados, y asegurar de esta forma la semejanza hidrodinámica entre ambos sistemas. Al comparar las porosidades de lecho de ambos sistemas, si bien en general cualitativamente se encontró una concordancia favorable, se observó también un incremento en las diferencias en la medida que el sistema en frío se alejaba del régimen de flujo de burbujas dispersas. Al parecer el incremento de la presión permite aumentar las velocidades de transición de gas y líquido entre los regímenes de burbujas dispersas y de burbujas en

coalescencia, lo cual no pudo ser recogido satisfactoriamente en el sistema en frío empleando únicamente los cinco números adimensionales considerados.

Con respecto al análisis estadístico de dispersión de datos, se presentaron diferencias entre los dos sistemas. Sin embargo las diferencias en general son menores del 15%, por lo que la semejanza hidrodinámica se aproxima bajo las condiciones de operación presentadas, particularmente a Re_g bajos, y se da una base razonable para el escalamiento de parámetros hidrodinámicos globales, en particular la porosidad del lecho. Por otra parte, adicionalmente se ha encontrado que la naturaleza del fluido empleado en los sistemas a comparar puede afectar la correspondencia entre sus características. Si bien la comparación de resultados muestra una concordancia favorable entre los dos sistemas para el comportamiento hidrodinámico, las diferencias en las tendencias pueden atribuirse a las características particulares de coalescencia que se presentan en los dos fluidos empleados. Por lo anterior, para futuros trabajos se sugiere la caracterización del fenómeno de coalescencia o espumado en los fluidos empleados, así como el uso de grupos adimensionales adicionales que permitan una mejor descripción del comportamiento hidrodinámico de estos sistemas.

Notación

A	área de sección transversal de la columna, m^2
d_p	diámetro de partícula, m
D_c	diámetro de columna, m
E_o	número de Eötvös, ($= g\Delta\rho d_p^2/\sigma$)
G	aceleración gravitacional, $9.8 m/s^2$
H	altura efectiva del lecho expandido, m
M	número de Morton, ($= g\Delta\rho\mu^4/(\rho_l^2\sigma^3)$)
Δp	gradiente de presión, Pa
Re_g	$Re_l * \beta_U = \rho_l d_p U_g / \mu_l$
Re_l	número de Reynolds del líquido, ($= \rho_l d_p U_l / \mu_l$)
U	velocidad superficial, m/s
W	inventario de partículas, kg
Δz	diferencia axial de altura, m

Símbolos griegos

β_d	razón de densidades, ($= \rho_g/\rho_l$)
β_U	razón de velocidades superficiales, ($= U_g/U_l$)
$\Delta\rho$	término de flotación, ($= \rho_l - \rho_g$), kg/m^3
ϵ	fracción volumen o porosidad sin subíndice
μ	viscosidad, Pa s
ρ	densidad, kg/m^3
σ	tensión superficial, N/m

Subíndices

g	gas
l	líquido
s	sólido
b	burbuja

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Instituto Mexicano del Petróleo para la realización de este trabajo.

Referencias

- National Institute of Standards and Technology (NIST) (2005). NIST-Número 69. Disponible en: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>. Accesado: 29 septiembre 2006.
- Bloxom, V. R., Costa, J. M., Herranz, J., MacWilliam, G. L. y Roth, S. R. (1975). Determination and correlation of hydrodynamic variables in a three-phase fluidized bed (Part IV), Report no. 219. *Oak Ridge National Laboratory*.
- Buckingham, E. (1914). On physically similar systems, illustrations of the use of dimensional analysis. *Physics Reviews* 4, 345-376.
- Davidson, J. F., Harrison, D. (1963). *Fluidized Particles*. Cambridge University Press, London and New York.
- Glicksman, L. R., Hyre, M. R., y Farrell, P. A. (1994). Dynamic similarity in fluidization. *International Journal of Multiphase Flow* 20S, 331-386.
- Horio, M., Nonaka, A., Sawa, Y. y Muchi, I. (1986). A new similarity rule for fluidized bed scale-up. *AIChE Journal* 32, 1466-1482.
- Jiang, P., Luo, X., Tsao-Jen y Fan, L.-S. (1997). High temperature and high pressure three-phase fluidization-bed expansion phenomena. *Powder Technology* 90, 103-113.
- Kim, S. D., Baker, C. G. y Bergougnou, M. A. (1977). Bubble characteristics in three-phase fluidized beds. *Chemical Engineering Science* 32, 1299-1306.
- Luo, X., Jiang, P. y Fan, L.-S. (1997). High-pressure three-phase fluidization: Hydrodynamics and heat transfer. *AIChE Journal* 43, 2432-2445.
- Macchi, A., Bi, H. T., Grace, J. R., McKnight, C. A. y Hackman, L. (2001). Dimensional Hydrodynamic Similitude in Three-Phase Fluidized Beds. *Chemical Engineering Science* 56, 6039-6045.
- Meernick, P. R. y Yuen, M. C. (1988). An optical method for determining bubble size distributions, II: Application to bubble size measurement in a three-phase fluidized bed. *Journal of Fluids Engineering* 110, 332-338.
- Safoniuk, M., Grace, J. R., Hackman, L. y McKnight, C. A. (1999). Use of dimensional similitude for scale-up of hydrodynamics in three-phase fluidized beds. *Chemical Engineering Science* 54, 4961-4966.
- Sánchez, J. L. (2007). *Estudio de la hidrodinámica de reactores de lecho ebullente para el hidrotatamiento de crudos pesados*. Tesis de Maestría UAM-I, México.
- Sánchez, J.L., Ruiz, R.S., Alonso, F. and Ancheyta, J. (2008). Evaluation of the hydrodynamics of high-pressure ebullated beds based on dimensional similitude. *Catalysis Today* 130, 519-526.
- Zhang, J. P., Grace, J. R., Epstein, N. y Lim, K. S. (1997). Flow regime identification in gas-liquid flow and three-phase fluidized beds. *Chemical Engineering Science* 52, 3979-3992.