



ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE BURBUJAS DISPERSAS EN UNA FASE CONTINUA

A HYDRODYNAMIC STUDY OF DISPERSED BUBBLES IN A CONTINUOUS PHASE

Edilberto Murrieta Luna, Agustín R. Uribe Ramírez, Ramiro Rivera Aguilera

Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Col. Noria Alta s/n, C.P. 36050, Guanajuato, Gto., México., Tel. (473) 732-0006 ext. 8139, email: agustin@ugto.mx

ABSTRACT

A hydrodynamic study regarding air bubbles dispersed in water using CFD techniques is presented. The equivalent diameter used is in the range of 2.5-13 mm, and the injection velocity is 0.1 m/s. The most common shape of the resulting bubbles was ellipsoidal. The error between the terminal velocity compared with the estimated velocity ranges from 0.4 to 10%.

Keywords: dispersed bubbles, CFD, bubble columns, multiphase flow.

RESUMEN

Se presenta un estudio hidrodinámico de burbujas de aire dispersas en agua utilizando técnicas de CFD. El diámetro equivalente fue 2.5-13 mm, la inyección de 0.1 m/s. La forma más común de las burbujas obtenidas fue elipsoidal. El error entre la velocidad terminal comparadas con la velocidad estimada fluctúa entre 0.4-10%.

Palabras clave: burbujas dispersas, CFD, columnas de burbujeo, flujo multifásico.



INTRODUCCIÓN

La caracterización de gotas y burbujas es esencial para muchas operaciones gas-líquido y líquido-líquido, no solo en relación con los procesos químicos, sino también, por ejemplo, en la biotecnología y la oceanografía. Modelar el comportamiento de las partículas individuales se considera un fenómeno complejo, particularmente si el objetivo es cubrir una amplia gama de propiedades. El estudio de la hidrodinámica de las partículas fluidas que ascienden libremente inmersas en un fluido continuo ha sido objeto de estudio desde el siglo pasado (Clift y col, 1978) y lo sigue siendo hasta la fecha (Bäumler y col, 2011). Este fenómeno atrae la atención de la comunidad científica, ya que representa un tipo de problema de frontera libre en dinámica de fluidos (Fox, 1995) y su entendimiento es básico para que los conocimientos adquiridos se puedan exportar a problemas multigotas o de nubes de burbujas que involucren transferencia de masa y calor (Brodkorb, 1999, Petera, 2001, Patankar y col, 1980, Gao y col, 2005, Darmana, 2006).

El tamaño de las gotas o burbujas depende de varios factores, tales como el diámetro de la boquilla de inyección, el tiempo de formación y las propiedades de los fluidos (Soleymani y col, 2008). El tamaño de las partículas fluidas influirá en la forma, velocidad de ascenso y trayectoria (Clift y col, 1978, Myint y col, 2007, Yang y col, 2007, Bäumler y col, 2010, Lau y col. 2010). En burbujas con diámetros mayores a 1 mm se observan deformaciones significativas debido a la variación de la presión hidrostática y dinámica sobre la superficie de las burbujas (Elingsen y Risso, 2001).

El comportamiento hidrodinámico de las partículas fluidas se puede representar mediante el uso de grupos adimensionales basados en las propiedades de los fluidos involucrados y de variables como la velocidad y el diámetro equivalente. Estos grupos son, principalmente, el número de Reynolds (Re), el número de Morton (M) y el número de Eötvös (Eo). Al graficar estos números se pueden predecir formas, diámetros y velocidades terminales de gotas y burbujas (Clift y col, 1978), como se muestra en la Figura 1.

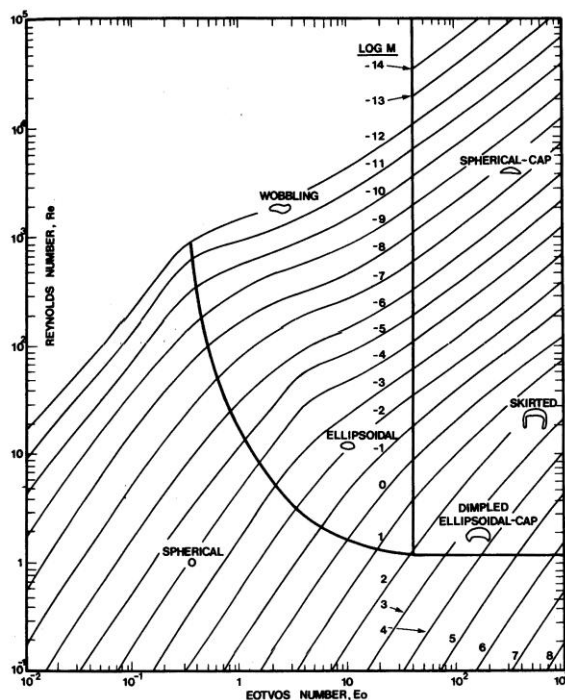


Figura 1. Límites entre los tres principales rangos en donde se ajustan las gotas de acuerdo a su forma, tomada de *Clift y col. (1978)*.

En este trabajo se presenta un estudio del comportamiento hidrodinámico de burbujas de aire inmersas en una fase continua (agua). El estudio se realiza a partir de la formación de la partícula, tomando en cuenta su ascenso libre, hasta llegar a la salida de la columna. Se diseñaron diferentes modelos variando el diámetro de boquilla de inyección y manteniendo constante la velocidad de inyección.

METODOLOGÍA

Se resolvieron numéricamente las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes mediante la discretización del dominio computacional por el método del *Volumen Finito*, en combinación con el modelo del *Volumen de Fluido* (VOF) para el seguimiento de la interfase en flujo multifásico (ANSYS Fluent User's Guide, 2011). Con el modelo VOF se aproximaron los cambios topológicos de las interfases inducidas por el movimiento relativo de los fluidos (Van Sint Annaland y col, 2005). El seguimiento de la interfase aire-agua está basado en el seguimiento de la fracción de volumen de aire que se encuentra en una



celda computacional, donde $\alpha_2 = 0$ en la fase líquida y $\alpha_2 = 1$ en la fase gaseosa, por lo que α toma valores entre 0 y 1.

Los resultados numéricos fueron comparados con datos experimentales tomados tanto de la bibliografía (De Vries, 2001, Myint, 2007, Bäumlér y col., 2010), como medidos en el laboratorio y reportados en otro trabajo (Murrieta Luna, 2011). Las propiedades de los materiales usados en la simulación son presentadas en la Tabla 1

Tabla 1 Propiedades de los fluidos. Sistema Aire-Agua.

Fluido	$\rho [kgm^{-3}]$	$\mu [mPas]$	$\sigma [Nm^{-1}]$
Aire	1.225	0.018	0.073
Agua	997.02	0.8903	

Ecuación de Fracción de Volumen

El movimiento de la interfase entre dos fluidos inmiscibles (burbuja de aire en agua) de diferentes densidades y viscosidades se predice al resolver la ecuación de conservación para la fracción de volumen de la fase dispersa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(\alpha_2)}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \alpha_2 = 0 \quad (1)$$

La ecuación de la fracción de volumen no se resuelve para la fase primaria (continua), α_1 . La fracción de volumen para esta fase primaria se calcula a partir de la fracción de volumen para la fase secundaria, α_2 , mediante la siguiente relación:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (2)$$

Propiedades Físicas

Las propiedades de los fluidos en las ecuaciones de transporte se determinan a partir de la fracción de volumen de cada una de las fases en cada celda computacional. La densidad y viscosidad en cada celda por donde pasa la interfase se calculan usando las siguientes ecuaciones:



$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (3)$$

$$\mu = \alpha_2 \mu_2 + (1 - \alpha_2) \mu_1 \quad (4)$$

El modelo planteado en 2D y 3D fue resuelto en estado no estacionario. El esquema de interpolación para la reconstrucción geométrica de la interfase dependiente del tiempo basado en la solución del método VOF se resolvió mediante el método *geo-reconstruct* (Fluent User's Guide, 2011) y se usó un esquema de discretización de segundo orden con diferencias hacia adelante para superar la difusión numérica. El esquema de acoplamiento presión-velocidad utilizado fue el algoritmo PISO (Fluent User's Guide 2011), el cual converge rápidamente y no presenta pérdidas significativas en la exactitud y estabilidad. La presión fue discretizada con el esquema PRESTO (Fluent User's Guide 2011) debido a su fuerte capacidad de convergencia. El paso del tiempo (Δt) fue elegido en base al número máximo de Courant ($C = \Delta t / (\Delta x / u)$) de 0.25.

Configuración de la Geometría

Con la finalidad de comparar los resultados numéricos, se realizaron simulaciones en 2D y en 3D. La columna de burbujeo que se usó en la simulación en 2D y 3D se muestra en la Figura 2a. Consta de un tanque cilíndrico sin agitación en el cual se inyecta la fase dispersa mediante una boquilla en forma de aguja. La inyección se realiza a diferentes diámetros de la boquilla. Las dimensiones son: diámetro de la columna, $D_T = 0.12 \text{ m}$, altura de la columna, $H_T = 0.50 \text{ m}$, volumen de la columna, $V_T = 22.6 \text{ L}$, altura de la boquilla de inyección, $H_B = 0.01 \text{ m}$ y diámetro de la boquilla, $d_B = 0.001$ a 0.007 m . La geometría se realizó con el paquete ANSYS Gambit, en el cual también se realizó el mallado de la columna en 2D y 3D.

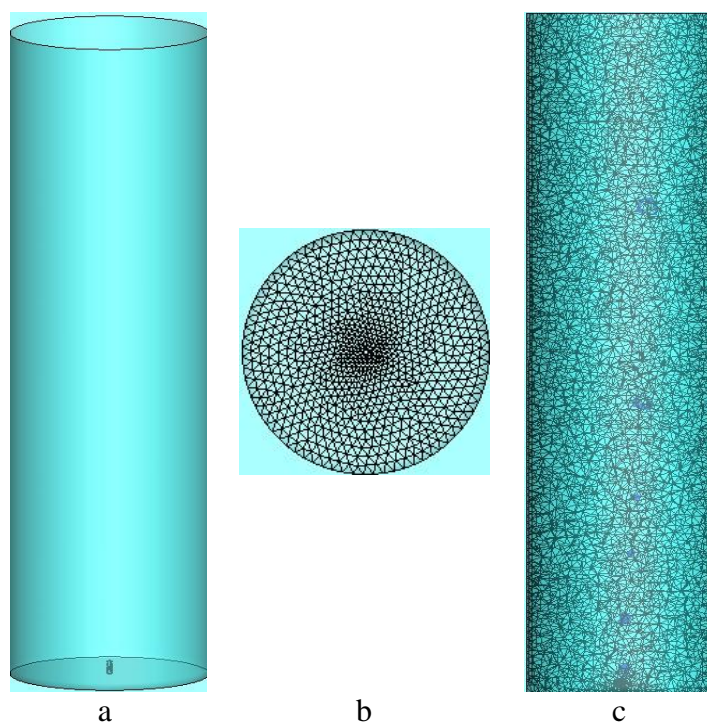


Figura 2. Geometría de la Columna de burbujeo. a) geometría, b) vista superior del mallado y c) vista lateral del mallado

De acuerdo a la estructura de la columna utilizada en 3D (Tres Dimensiones), el uso de una malla estructurada complica la realización de la geometría pues no es fácil que esta se adecue a todas las particularidades del diseño, y para lograr que se adecue se tiene que disminuir en una gran cantidad el tamaño de la celda y con esto se incrementa el número de nodos, aumentando de esta forma el costo computacional y el tiempo de las simulaciones. Por otro lado si se utilizan mallas no estructuradas es más fácil adecuarlas con elementos de forma irregular que no necesariamente deben ser muy pequeños. El uso de 2D (Dos Dimensiones) se da para hacer una simplificación del estudio ya que se disminuye considerablemente el número de nodos de la malla a resolver. Esta simplificación nos permite trabajar sobre un plano y con esto nos brinda la posibilidad de trabajar con elementos estructurados y no estructurados, no encontrándose esta facilidad en 3D.

La malla de la geometría en 3D está constituida por 227,841 celdas (tetraedros y triángulos), 464,413 caras y 43,681 nodos. La malla híbrida es una malla no-estructurada



que contiene diferentes tipos de celdas y es mostrada en las Figuras 2b y 2c. Para las simulaciones en *2D* se utilizó una malla cuadrada con 60,621 nodos, 120,000 caras y 60,000 celdas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las gotas y burbujas siguen una trayectoria ascendente oscilatoria que tiende a mantenerse cerca de la línea central a lo largo de la columna, saliendo por la parte superior. La pared de la columna no afecta el movimiento de las burbujas de manera significativa, por lo que el ascenso de la gota es totalmente libre.

Trayectoria de las Burbujas Ascendentes

Los números de Reynolds obtenidos en este trabajo son mayores a 700 y menores a 3000. Los diámetros obtenidos en este trabajo son mayores de 2 mm, por lo que se pueden predecir los tres tipos de movimiento, esto en base a los criterios presentados por G. de Vries (2001).

En la Figura 3 se presentan las trayectorias de las burbujas formadas para diferentes diámetros de boquilla de la válvula de inyección.

Al encontrar inestabilidades, se provoca un movimiento zigzagueante o en espiral. Es muy ilustrativo analizar estos casos, tanto en *2D* como en *3D*, pues al observar las gráficas de las trayectorias, se aprecia notablemente cuánto se desvían de la línea central de la columna. Si se observa el alzado de la Figura 3a, se puede notar que su centro de masa se aleja más de la línea central de la columna y tienen más oscilación, la vista lateral lo confirma. La Figura 3b presenta un comportamiento similar.

En el caso presentado en la Figura 3c se observa un movimiento zigzagueante, se mueve hacia las orillas, pero tiende a regresar a la línea central. En la Figura 3d se muestra el ascenso de una burbuja que inicia su movimiento hacia la derecha de la columna, pero al



moverse a la izquierda ya no regresa hacia la línea central y se desvía con un movimiento oscilante, saliendo muy alejada del centro de la columna.

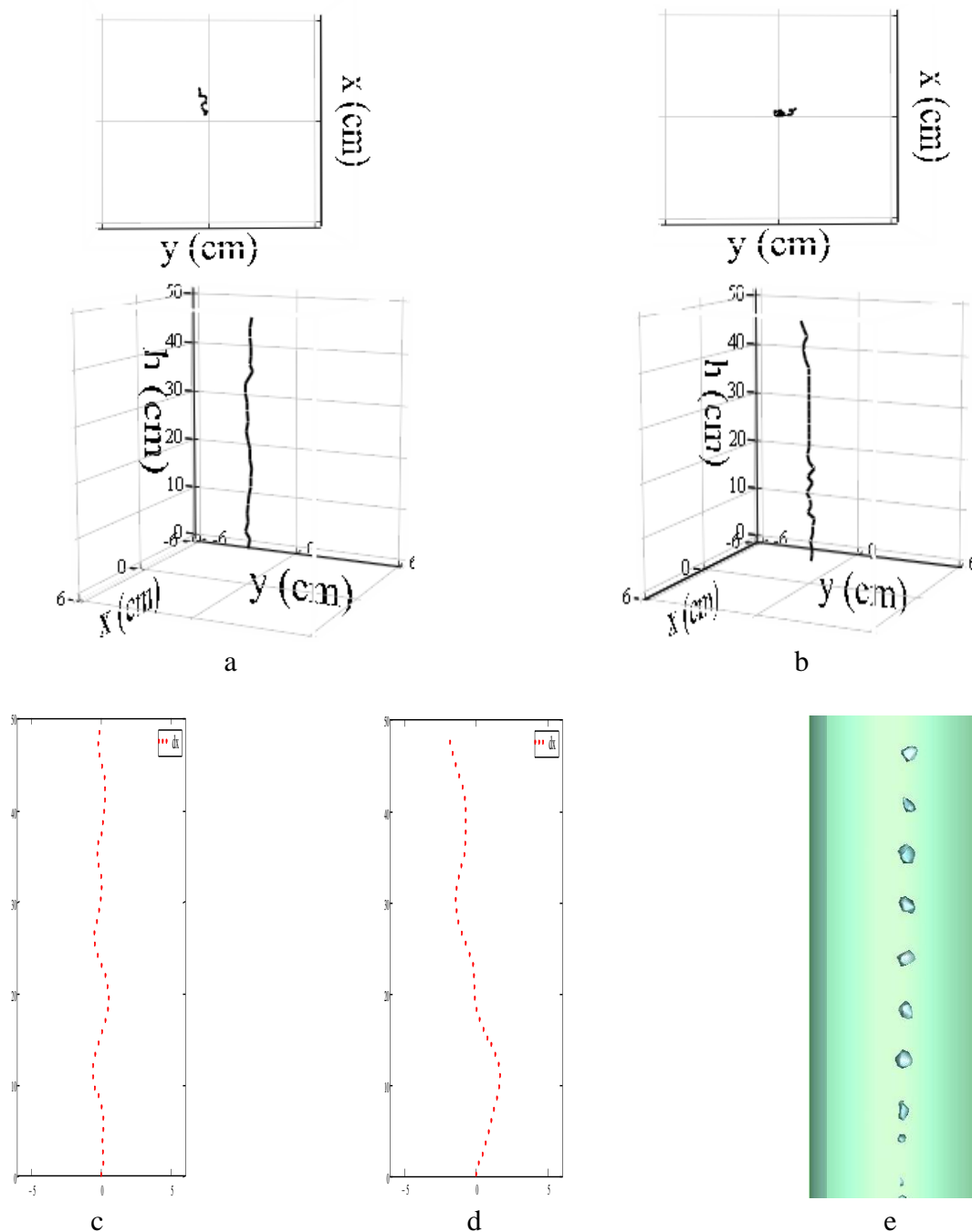


Figura 3. Trayectoria seguida por las burbujas de aire al ascender por la columna. a) boquilla de inyección de 2 mm en 3D, en la parte superior vista de alzado y en la parte inferior vista lateral, b) boquilla de inyección de 4 mm en 3D, en la parte superior vista de alzado y en la inferior vista lateral, c) boquilla de inyección de 2 mm en 2D, d) boquilla de inyección de 5 mm en 3D, e) diagrama de fases.



Forma de las Burbujas

Debido a las propiedades físicas de los fluidos y al tamaño y velocidad de ascenso de las burbujas, el resultado de las simulaciones son burbujas oscilantes. En la Figura 3e se presenta un diagrama de fases de una cadena de burbujas de aire en la cual se puede observar la manera en que se deforma una burbuja cuando asciende por la columna. En la vista transversal mostrada se puede apreciar claramente la forma en que varían los diámetros internos de las burbujas

Se presentan dos tipos principales de burbujas, la esférica y la elipsoidal. En el caso de dos dimensiones predomina la forma elipsoidal, solo cuando se forma la burbuja tiende a ser alargada y al desprenderse de la boquilla de inyección, pasa por la forma de casquete esférico, se alarga y toma la forma elipsoidal.

En la Figura 4 se muestra la variación de los radios de la burbuja y la forma en que varía el área superficial para los diferentes casos simulados. En la Figura 4a se puede apreciar que los radios tiene poca variación, debido que la burbuja es pequeña, pues el promedio de su diámetro equivalente es de 2.4 mm . Como el diámetro pequeño evita que la deformación de la burbuja sea muy grande, la variación del área superficial es muy poca, teniendo un promedio de 21.9 mm^2 comparada con el área de una esfera, la cual el promedio sería de 20.18 mm^2 .

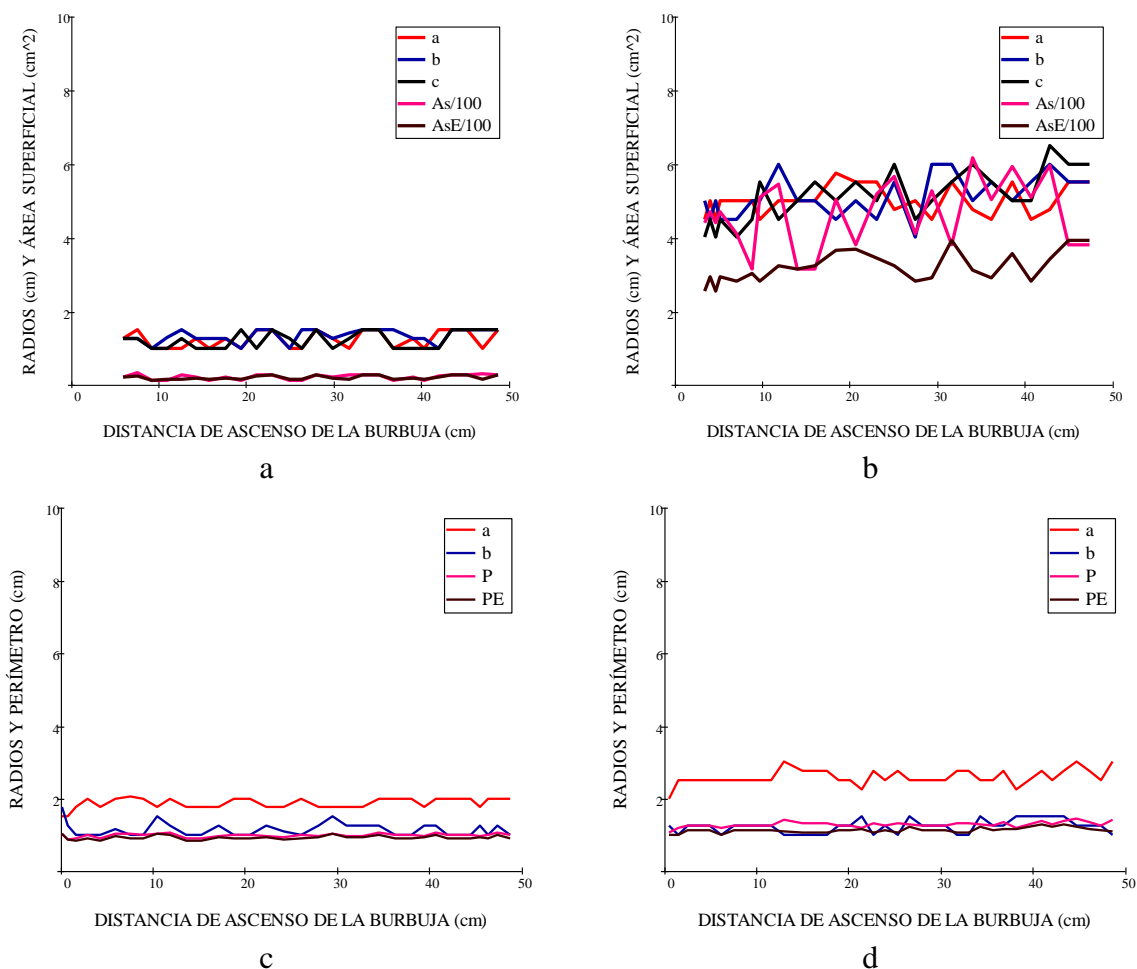


Figura 4. Forma de variación de los diámetros de las burbujas y comparación entre el área superficial de las burbujas contra el de la esfera formada por el diámetro equivalente. a) boquilla de inyección de 2 mm en 3D, b) boquilla de inyección de 4 mm en 3D, c) boquilla de inyección de 2 mm en 2D y d) boquilla de inyección de 5 mm en 3D.

En la Figura 4b se muestra que la variación de diámetros es permanente durante el ascenso, lo cual indica que la burbuja se deforma al ascender por la columna. El diámetro equivalente de la burbuja es mayor, esto da como resultado una mayor variación en la deformación y en el área superficial. Si se compara el área superficial de la burbuja con la de la esfera correspondiente al diámetro equivalente se aprecia una mayor variación y una menor aproximación entre estas, que va desde un 5 % hasta un 60 %, ya que las áreas encontradas tiene un valor numérico de 119 mm^2 hasta los 250 mm^2 . Este fenómeno se



presenta porque la deformación de la gota incrementa el área superficial para un mismo volumen de fluido.

Velocidad de Ascenso

Después de que la burbuja sale del orificio de inyección, se eleva a través del líquido y alcanza una velocidad constante, lo que se conoce como velocidad terminal. La velocidad media de ascenso se puede calcular a partir de las posiciones relativas de la burbuja en un intervalo de tiempo.

En la Figura 5 se puede apreciar la velocidad de ascenso de la burbuja de aire respecto a distancia de ascenso una vez que se ha liberado de la boquilla de inyección. Así mismo, se compara la velocidad media de ascenso contra la velocidad calculada mediante la relación empírica formulada por Comolet (1971). En todos los casos se puede observar que la velocidad terminal alcanza rápidamente el valor de la velocidad media, y que la velocidad obtenida usando la ecuación de *Comolet* tiene variaciones pequeñas conforme asciende la burbuja.

En todos los casos, la velocidad determinada por la ecuación de Comolet (1971), varía de los 0.239 m/s hasta los 0.276 m/s , mientras que la velocidad media calculada experimentalmente fue de 0.25 m/s . Las velocidades terminales calculadas en las simulaciones fluctúan entre 0.162 m/s y 0.297 m/s . Los errores calculados entre la velocidad experimental y la velocidad media varia es del 4% al 30%, mientras que respecto a Comolet el error va desde 0.4% hasta un máximo de 10%. Los resultados numéricos se presentan en la Tabla 2.

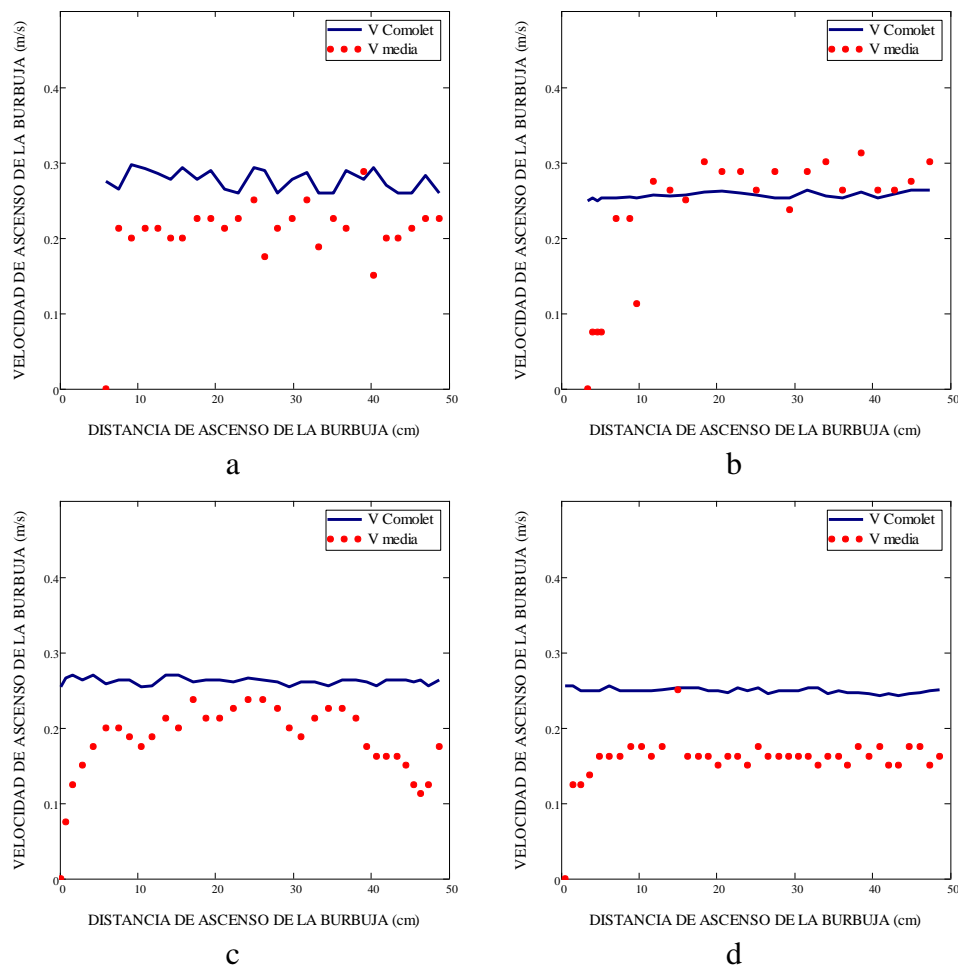


Figura 5. Relación entre velocidad de ascenso y distancia de ascenso para distintos casos obtenidos numéricamente en este trabajo comparados con los de *Comolet (1971)*. a) boquilla de inyección de 2 mm en 3D, b) boquilla de inyección de 4 mm en 3D, c) boquilla de inyección de 2 mm en 2D y d) boquilla de inyección de 5 mm en 2D.

Tabla 2. Resultados numéricos obtenidos de las simulaciones realizadas en este trabajo.

Diámetro de la boquilla, d_b (mm)	Excentricidad, ε	Diámetro equivalente, d_e (mm)	Área superficial, A_s (mm ²)	Velocidad de ascenso, \bar{U} (m/s)	Número de Reynolds, Re
2	0.262	2.49	21.90	0.20	768.79
	0.297				
4	0.393	10.46	520.68	0.28	33372.60
	0.303				
2	0.569	2.94	9.25	0.16	708.45
5	0.684	4.22	13.27	0.19	1087.84



CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizaron técnicas de *CFD* para modelar el comportamiento hidrodinámico de burbujas en columnas de burbujeo. En objetivo principal fue el de conocer más profundamente el comportamiento hidrodinámico de burbujas para su posterior aplicación en el diseño de equipo de procesos de separación. Se obtuvieron diferentes tipos de burbujas, áreas superficiales, diámetros equivalentes, velocidades de ascenso y trayectorias. Los resultados se presentan gráficamente en términos de números adimensionales y se comparan con la literatura existente. Las conclusiones principales son:

1. Las burbujas más pequeñas (2.49 y 2.94 mm) exhiben un movimiento más cercano al eje vertical de la columna que las de mayor tamaño (10.46 mm), las cuales presentan un movimiento zigzagueante, debido a que estas últimas tienen una mayor resistencia al flujo en la parte superior de la burbuja.
2. Los números de Morton y de Reynolds calculados en este trabajo, concuerdan con los reportados por Clift y col (1978).
3. Para la predicción de la forma de las burbujas, se utiliza la misma gráfica de Clift y col. (1978). La forma más común encontrada de las burbujas obtenidas en las simulaciones es la elipsoidal, aunque al inicio del desprendimiento adquieren forma esférica.
4. El valor del error calculado a partir de los datos obtenidos en las simulaciones fue relativamente pequeño, por lo que es factible utilizar las expresiones reportadas en la literatura para determinar las velocidades terminales de las burbujas de aire.
5. De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, se puede concluir que los datos que se obtengan mediante esta metodología son confiables para su uso en el análisis de burbujas inmersas en una fase continua.



BIBLIOGRAFÍA

- ANSYS Fluent User's Guide, Release 14.0, ANSYS, Inc., USA, November 2011.
- Bäumler, K., Wegener, M., Paschedag, A.R. and Bänsch, E.** (2010) Drop rise velocities and fluid dynamic behavior in standard test systems for liquid/liquid extraction - experimental and numerical investigations, *Chem. Eng. Sci.*, 66 (3) 426-439.
- Brodkorb, M.**, (1999), Multicomponent and Contamination Effects in Liquid-Liquid Extraction. Shaker-Verlag GmbH, Germany.
- Clift, R., Grace, J.R. and Weber, M.E.**, (1985), Bubbles, Drops and Particles. Academic Press; New York, USA.
- Darmana, D.**, (2006), On the Multiscale Modelling of Hydrodynamics, Mass Transfer and Chemical Reactions in Bubble Columns, Doctoral Thesis, The Netherlands.
- De Vries, A.W.** (2001) Path and Wake of a Rising Bubble, Ph.D. Thesis, University of Twente.
- Fox, R.W., McDonald, A.T.** (1995) Introducción a la Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill1, México, 4a Ed.
- Gao, T.C., Chen, R.H., Pu, J. Y. and Lin, T.H.**, (2005), Collision Between an Ethanol Drop and a Water Drop, *Experiments in Fluids*, 38, 7312-738.
- Lau, R., Mo, R. and Beverly Sim W.S.**, (2010), Bubble Characteristics in Shallow Bubble Column Reactors, *Chem. Eng. Res. and Des.* 88, 197-203.
- Murrieta Luna, E.**, (2011) Estudio de la Hidrodinámica en Flujos Multifásicos Mediante CFD, Tesis de Doctorado, Universidad de Guanajuato.
- Myint, W., Hosokawa, S. and Tomiyama, A.**, (2007) Shapes of Single Drops Rising Through Stagnant Liquids, *J. Fluid Sci. and Tech.* 2 (1) 184-195.
- Patankar, S.V. and Spalding, D.B.**, (1972), A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows. *Int. J. Heat and Mass Trans*, 15, 1787-1806.
- Petera, J., Weatherley, L.R.** (2001), Modeling of Mass Transfer from Falling Droplets, *Chem. Eng. Sci.*, 56, 4929-4947.
- Soleymani, A., Laari, A. and Turnen, I.** (2008), Simulation of Drop Formation in a Single Hole in Solvent Extraction Using the Volume-Of-Fluid Method, *Chem. Eng. Res. and Des.* 86, 731-738.
- M. van Sint Annaland, N.G. Deen, and J.A.M. Kuipers**, (2005) Numerical simulation of gas bubbles behavior using a three-dimensional volume of fluid method, *Chem. Eng. Sci.*, 60, 2999 - 3011
- Yang, G.Q., Du, B. and Fan, L.S.**, (2007), Bubble Formation and Dynamics in Gas-Liquid-Solid Fluidization -A Review, *Chem. Eng. Sci.*, 62, 2-27.