

DIFERENCIAS ENTRE LOS VALORES DE LA TENSIÓN INTERFACIAL DINÁMICA DE GOTAS DE AGUA EN CO₂ y BURBUJAS DE CO₂ EN AGUA

JUAN MELÉNDEZ, SUSANA ZEPPIERI, AURA LÓPEZ DE RAMOS

Universidad Simón Bolívar, Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia, Grupo de Investigación de Fenómenos de Transporte (G10),

Apartado Postal 89000, Caracas 1080-A, Venezuela. Email: alopez@usb.ve, alopez.usb@gmail.com

Recibido: febrero 2011

Recibido en forma final revisado: abril 2012

RESUMEN

La tensión interfacial dinámica (γ) del agua en un ambiente gaseoso de CO₂ fue determinada a 20, 30, 40 y 50 °C y a presiones de 0, 1, 2, 3, 4 y 5 MPa. También fue calculada la tensión interfacial de burbujas de CO₂ en agua a 30, 40 y 50 °C y a presiones de 2 y 3 MPa. Se usó el método de la gota colgante (agua como fase dispersa y CO₂ como fase continua) o su variación de la burbuja emergente (CO₂ como fase dispersa y agua como fase continua), manteniendo tanto la presión como la temperatura constante y variando solamente el volumen de la fase dispersa. Los valores obtenidos de γ de equilibrio de la gota estuvieron entre 33,1 y 68,5 mN/m, mientras que para el caso de la burbuja estos valores estuvieron comprendidos entre 26,6 y 41,7 mN/m. Tanto para la burbuja como para la gota, los valores de la tensión interfacial mostraron un decrecimiento con el tiempo, para cada condición de T y P estudiadas. El valor de γ en el caso de la burbuja de CO₂ disminuye ligeramente al aumentar la temperatura, pero en el caso de la gota de agua a altas presiones, γ aumenta al incrementarse la temperatura. Los valores de γ obtenidos fueron diferentes en los casos cuando las fases continuas y dispersas cambiaban: cuando el CO₂ era la fase dispersa (burbuja de CO₂) el valor de γ fue menor que cuando el gas era la fase continua (gotas de agua) a las mismas condiciones de T y P. Estas diferentes se deben a que el sistema estudiado se comporta como uno sistema no ideal. El CO₂ cuando se disuelve en el agua provoca un hinchamiento en ésta lo que hace que las fuerzas superficiales presenten un comportamiento diferente dependiendo de cuál sea la fase dispersa y el sentido del flujo difusivo entre las dos fases.

Palabras Clave: Tensión interfacial, Tensión interfacial de equilibrio, Burbujas de CO₂, Efectos de temperatura y presión, Sistemas CO₂-agua.

DIFERENCES BETWEEN DINAMIC INTERFACIAL TENSION VALUES OF WATER DROPS IN CO₂ AND CO₂ BUBBLES IN WATER

ABSTRACT

The dynamic interfacial tension of water in a gaseous environment of CO₂ was determined at 20, 30, 40 and 50 °C and pressures of 0, 1, 2, 3, 4, and 5 MPa. It was also calculated the interfacial tension of CO₂ bubbles in water at 30, 40 and 50 °C and pressures of 2 and 3 MPa. For the determination of these interfacial tensions the pendant drop method was used (water as dispersed phase and carbon dioxide as a continuous phase) or its variation of the emergent bubble method (carbon dioxide as dispersed phase and water as a continuous phase), keeping both pressure and temperature constant and varying only the volume of the dispersed phase. The values obtained from the equilibrium surface tension of the drop ranged from 33.1 and 68.5 mN/m, while for the case of the bubble these values ranged between 26.6 and 41.7 mN/m. For both cases, the bubble and the drop, the interfacial tension values showed a decreasing tendency over time for each condition of temperature and pressure selected. In the case of bubble, the value of interfacial tension decreases as the temperature increases, but in the case of the water drop at high pressures, interfacial tension increases as temperature increases. The interfacial tension values obtained were different in cases where continuous and dispersed phases changed:

When the CO_2 was the dispersed phase (bubbles of CO_2) the value of interfacial tension was smaller than when the gas was the continuous phase (drops of water) at the same temperature and pressure. These differences are due to this system behaves as a non-ideal one. When CO_2 is dissolved in the water phase causes a swelling of the mixture (a notorious change in volume) and the interfacial forces have a different behaviour depending on which are the dispersed phase and the direction of mass flow between the two phases.

Keywords: Interfacial tension, Equilibrium interfacial tension, CO_2 bubble, Pressure and temperature effects, CO_2 -water systems.

INTRODUCCIÓN

La tensión interfacial juega un papel muy importante en la elaboración y formulación de emulsiones, en el desarrollo de nuevas tecnologías para reacciones químicas y en el diseño de equipos de procesos de separación (Chun & Wilkinson, 1995; Zeppieri et al. 2001; Hebach et al. 2002; Tewes & Boury, 2004). El conocimiento de la tensión interfacial es también relevante en los procesos de recuperación de crudos (EOR, por sus siglas en inglés Enhance Oil Recovery) debido a que con la inyección de ciertas sustancias (como CO_2 y surfactantes) la tensión interfacial del crudo disminuye, permitiendo su desplazamiento a través del medio poroso, hasta la boca del pozo. La razón de este incremento en la recuperación de crudos, es la disminución de las fuerzas capilares que mantienen el crudo atrapado en el poro (López de Ramos, 1993; Ren et al. 2000; Aguilera et al. 2002; Aguilera & López de Ramos, 2004).

Muchos métodos existen para medir la tensión interfacial, tales como el método del anillo de Du Noüy, el Plato de Wilhelmy, la gota colgante, el ascenso capilar, la rotación del menisco y de la gota colgante. Para condiciones de alta presión y temperatura, las opciones se reducen a métodos como el de la gota colgante (Adamson & Gast, 1997; Ren et al. 2000; Tewes & Boury, 2004) y el ascenso capilar (Hebach et al. 2002).

Se han hecho experimentos de gotas de agua en CO_2 (Hebach et al. 2002; Hebach et al. 2005; Yang et al. 2006; Kvamme et al. 2007; Jaeger & Eggers, 2009), y burbuja de CO_2 en solución salina (Chalbaud et al. 2009), pero no se han presentado trabajos de investigación en los cuales se muestre experimentalmente las diferencias del comportamiento y los valores de la tensión interfacial a varias condiciones de presión y temperatura en un intervalo de tiempo.

El objetivo de este trabajo es medir la tensión interfacial del sistema agua- CO_2 , que es un sistema no ideal, utilizando dos configuraciones. La primera es con la gota colgante: formando una gota de agua en una fase gaseosa continua de dióxido de carbono. La segunda con la burbuja emergente: formando una burbuja de CO_2 en una fase líquida continua

de agua. En las dos configuraciones se medirán las tensiones interfaciales de equilibrio y se compararán entre sí. Para el caso de la gota colgante se trabajó con cuatro temperaturas ($T= 20, 30, 40$ y 50 °C) y cinco presiones 0, 1, 2, 3, 4 y 5 MPa y para el caso de la burbuja emergente se seleccionaron tres temperaturas ($T= 30, 40$ y 50 °C) y dos presiones 2 y 3 MPa. Esta comparación es muy útil para el diseño de equipos de contacto gas líquido que usen sistemas de este tipo (altamente no ideales) y que requieran de propiedades superficiales.

MODELO MATEMÁTICO

Ecuación de Laplace-Young

En la Figura 1 se muestra el esquema de una gota colgante con algunas de las variables físicas que se usarán en esta sección.

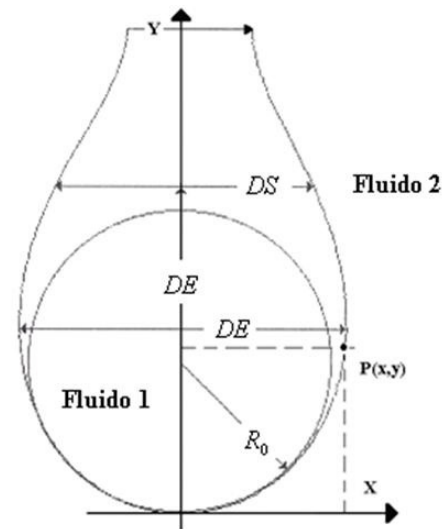


Figura 1. Perfil de una gota colgante mostrando las variables de la ecuación de Laplace-Young en coordenadas x - y y las variables geométricas para la ecuación de Fariñas et al. 1998

La ecuación de Laplace-Young se puede enunciar de una forma sencilla de la siguiente manera: La suma de las curvaturas a un punto de la superficie de una gota de líquido que cuelga de cualquier superficie sólida, es proporcional a la presión hidrostática que existe sobre él. Es decir que:

$$\frac{2}{R_0} - \frac{\Delta\rho g}{\gamma} y = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = 2H \quad (1)$$

donde: R_0 es el radio de curvatura de gota en su ápice, $y = 0$, $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ es la diferencia de densidades entre los dos fluidos, γ es la tensión interfacial entre los dos fluidos, R_1 y R_2 son los radios de curvatura principales de la interface y H es la curvatura promedio de la superficie libre.

Una gota colgante bien formada puede considerarse una superficie cilíndrica, esto es que tiene un eje de simetría vertical cuyo volumen puede ser generado por la rotación de una curva en un espacio tridimensional.

Es por ello que se dispone del perfil de la gota $y(x)$ ó $x(y)$ es posible escribir las ecuación 1 en términos de primeras y segundas derivadas (López de Ramos et al. 1993):

$$2H = \frac{y_x}{x(1+y_x)^{1/2}} + \frac{y_{xx}}{x(1+y_x)^{3/2}} = \frac{1}{x(1+x_y)^{1/2}} + \frac{x_{yy}}{x(1+x_y)^{3/2}} \quad (2)$$

donde: y_x y y_{xx} son las derivadas de primer y segundo orden de y con respecto a x , x_y y x_{yy} son las derivadas de primer y segundo orden de x con respecto a y .

Procedimiento de cálculo de la tensión interfacial

Con la ecuación 2 es posible estimar la curvatura de la gota a cualquier posición xy , simplemente calculando las derivadas de primer y segundo orden. Para calcular las derivadas y evitar el ruido experimental en los resultados, se puede utilizar el método desarrollado por López de Ramos et al. (1993) quienes usaron el método de aproximación basado en Splines de tercer y cuarto orden. Graficando la curvatura en función de y , se obtiene una línea recta de cuya pendiente ($\frac{\Delta\rho g}{\gamma}$) se puede calcular la única variable desconocida que es la tensión interfacial, . Esta ecuación también puede ser resuelta numéricamente aplicando el método de Kutta-Merson, en el cual el resultado es una correlación que permite calcular la tensión interfacial a partir de las variables geométricas de la gota, como lo son del el diámetro ecuatorial (DE) y el diámetro DS que es el diámetro de la gota medido en $y = DE$, tal y como se muestra en la Figura 1 (Fariñas et al. 1998; Fuentes & López, 2001).

$$\frac{\Delta\rho g R_0}{\gamma} = 0,147272 - 0,8541 \left(\frac{DS}{DE} \right) - 1,9216 \left(\frac{DS}{DE} \right)^2 - 0,61679 \left(\frac{DS}{DE} \right)^3 \quad (3)$$

Para el caso de la burbuja emergente todas las ecuaciones presentadas en esta sección siguen siendo válidas.

TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Materiales

El dióxido de carbono (CO_2) usado tenía una pureza de 99% V/V. y fue almacenado a una presión de 7,6 MPa. El cilindro de aire comprimido tenía una presión de 20 MPa. El agua empleada fue destilada en el Laboratorio de Fenómenos de Transporte de la Universidad Simón Bolívar usando un equipo de destilación Corning AG-11.

Equipo experimental

Como se muestra en la Figura 2, el equipo experimental consiste de una celda de acero inoxidable diseñada para soportar presiones hasta de 35 MPa con dos cristales de cuarzo de 6 mm de espesor, montados en "O" Rings de 16,5 de diámetro interno (López de Ramos, 1993; López de Ramos et al. 1993).

Esta celda ha sido probada en la determinación de tensiones superficiales e interfaciales para la formación de gota colgante o emergente dando buenos resultados que han sido reportados en la literatura especializada (López de Ramos et al. 1993; Fariñas et al. 1998; Zeppieri & López de Ramos, 2001; López de Ramos & Zeppieri, 2005; Zeppieri et al. 2009; Zeppieri & López de Ramos, 2009; Miquilena et al. 2010). La celda tiene una cámara interna que está totalmente sellada, impidiendo una posible contaminación con el ambiente externo. Para la formación de gotas o burbujas, se dispone de agujas (tubos capilares) de diferentes diámetros. Las gotas son formadas inyectando líquido por la parte superior de la celda; mientras que para las burbujas, la fase gaseosa se introduce por la parte inferior de la celda.

El equipo consta también de dos cilindros de muestras de alta presión diseñados y contruidos específicamente para estos experimentos de acuerdo con normas ASTM (*American Society for Testing and Material*, A 736/A 736M – 88). Estos cilindros consisten de un cuerpo hueco, un pistón con doble sellos de O-rings de diámetro interno 1,8 mm y una tapa hermética.

Además se dispone de un baño térmico (*HAAKE-A81* and *HAAKE-FE2*), un lente Micro (*Nikon* 60 mm) con un anillo de expansión (*Nikon* pk-13), una cámara de video (*Sony* CCD XC-ST70), una lámpara de fibra óptica (*Dolan-Jenner* MI-150), un transductor de presión con su respectivo indicador (*Validyne* DP 15-22 y CD 23), una tarjeta de adquisición de presión (*Measurement Computing* PCI DAS-1000), una tarjeta de adquisición de temperatura (*Measurement Computing* USB-TEMP), una válvula

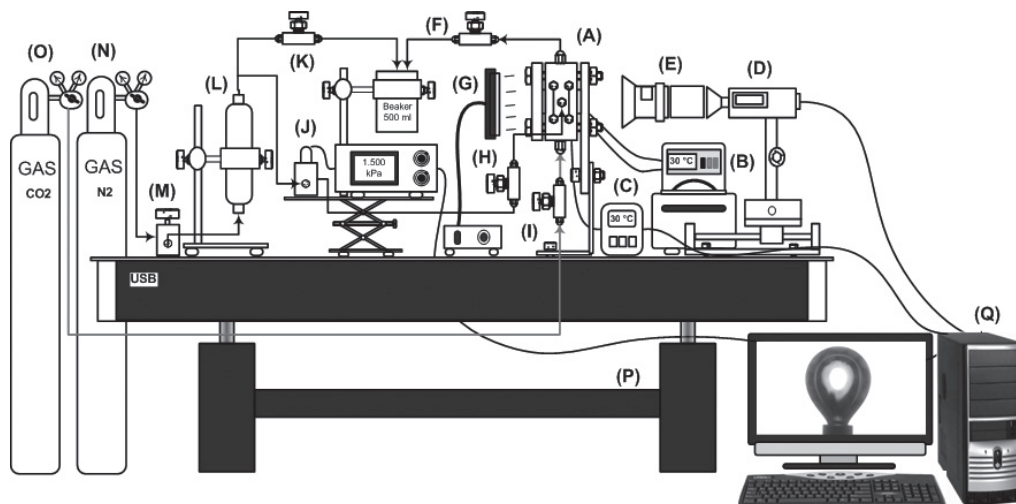


Figura 2. Equipo experimental usado para el Método de la Gota Colgante y Burbuja Emergente.: (A) Celda de alta presión, (B) baño termostático, (C) termómetro digital, (D) cámara de video, (E) lente micro, (F) válvula de purga de la celda, (G) lámpara de fibra óptica, (H) válvula de entrada de agua a la celda, (I) válvula micrométrica, (J) transductores de presión, (K) válvula de purga de la muestra, (L) cilindro de alta presión, (M) válvula reguladora de presión, (N) cilindro de nitrógeno, (O) cilindro de dióxido de carbono, (P) mesa óptica con aislamiento para vibraciones, (Q) computadora

micrométrica (Swagelok SS-SS2-316), cuatro válvulas de aguja (Whitey SS-IRM4), una tarjeta de captura de video (Pinchale System), una válvula de control de presión (Swagelok KCP1MRA2A2P10000), una bomba de vacío (Lammert) y una computadora. Todo el equipo está montado sobre una mesa óptica con un sistema de amortiguación neumático para aislarla y reducir las vibraciones.

Es importante controlar la presión y la temperatura dentro de la celda para cada experimento en las modalidades gota colgante o burbuja emergente. Con la metodología experimental usada, se obtuvo un promedio del coeficiente de variación de todas las presiones desarrolladas en este trabajo de investigación igual a 1,35%, con una desviación estándar promedio de $\pm 0,04$ kPa; mientras que para las temperaturas el promedio del coeficiente de variación fue de 0,2%, con un promedio de la desviación estándar de $\pm 0,06$ °C; la variación de estos parámetros durante los 24000 s, tiempo máximo de duración de los experimentos, se puede observar en la Figura 3.

Para cada sistema a cada condición de P y T, se procesaron más de 1000 imágenes con las cuales, posteriormente, se hizo el cálculo de la tensión interfacial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se reportan los valores de la tensión interfacial dinámica para el sistema agua-dióxido de carbono, así como también los de la tensión interfacial de equilibrio. Esta tensión es definida como el valor asintótico

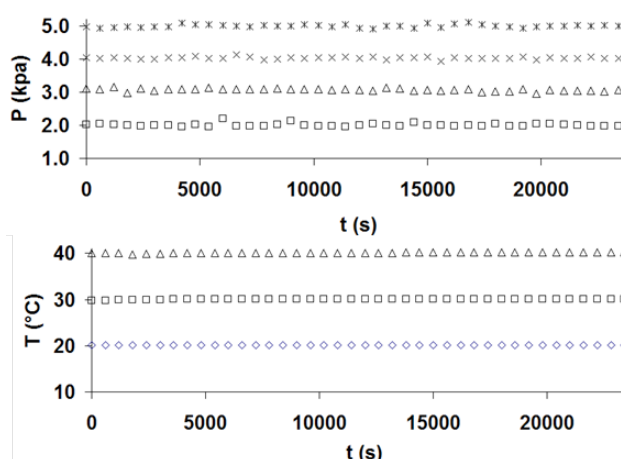


Figura 3. Variación de la presión y temperatura del sistema Agua - CO₂

de la tensión interfacial cuando ésta se grafica en función del tiempo.

Sistema agua-dióxido de carbono

Para este sistema se usó la modalidad de la gota colgante ya que la fase dispersa (agua) es más densa que la fase continua (dióxido de carbono). Para este caso se pudo trabajar a presiones manométricas entre 0 y 5 MPa.

La Figura 4 muestra un serie de cuatro imágenes de la gota de agua en un ambiente de dióxido de carbono a 3 MPa y 30°C. Puede observarse que a medida de que el tiempo avanza la gota se estiliza ligeramente y el valor de la tensión interfacial va disminuyendo de 50,36 mN/m a 44,89 mN/m.

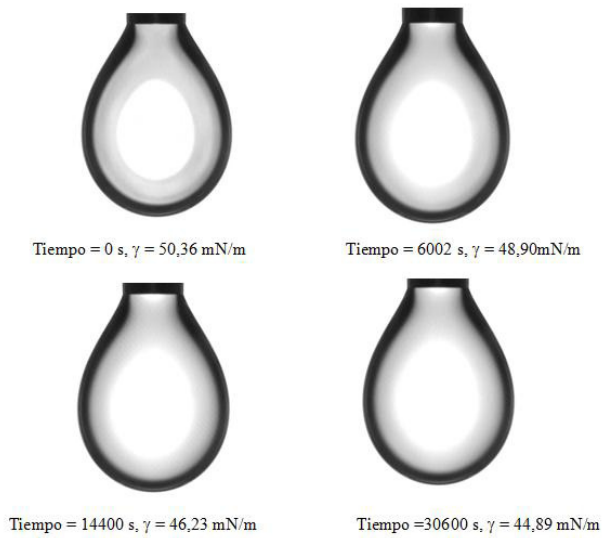


Figura 4. Secuencia de la gota de agua en dióxido de carbono a 3 MPa y 30 °C

Este mismo comportamiento puede observarse en la Figura 5 donde el valor de la tensión interfacial va disminuyendo con el tiempo hasta alcanzar el valor de equilibrio.

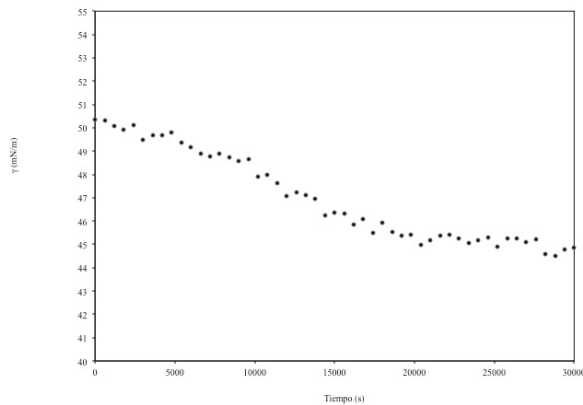


Figura 5. Cambio de la tensión interfacial para el sistema agua-CO₂ a 3 MPa y 30 °C

En la Figura 6 se puede observar los valores de la tensión interfacial de equilibrio para las temperaturas y presiones seleccionadas.

Se pudo verificar que la tensión interfacial de equilibrio disminuye a medida de que la presión aumenta y disminuye a medida de que la temperatura aumenta. Hay un punto a 4 MPa en el cual esta tendencia se revierte. Este comportamiento es esperado ya que fue reportado por Tewes & Boury (2004) cuyos experimentos se hicieron manteniendo el volumen constante y presión variable. Posteriormente fue corroborado por Meléndez (2007) con

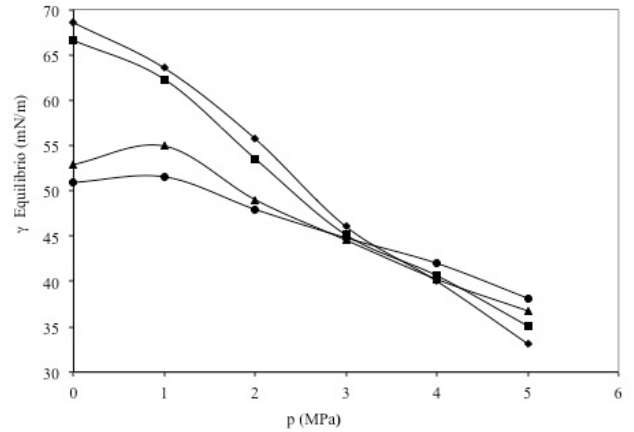


Figura 6. Variación de la tensión interfacial de equilibrio en función de la presión para el sistema agua-CO₂ a diferentes temperaturas (◆ 20 °C ■ 30 °C ▲ 40 °C ● 50 °C)

experimentos a volumen variable y presión constante, resultados que se reportan en este trabajo.

Sistema dióxido de carbono-agua

Para este sistema fue necesario usar la modalidad de burbuja emergente, ya que la fase discontinua (CO₂) es menos densa que la continua.

La tensión interfacial entre la burbuja de CO₂ y el agua fue determinada a 2 y 3 MPa y temperaturas de 30, 40 y 50 °C en función del tiempo.

En la figura 7 se muestra una secuencia de fotografías de una burbuja de CO₂ en agua a las condiciones de 3 MPa y 30 °C. Puede observarse la reducción del tamaño de la burbuja a medida de que el gas se difunde en la fase líquida.



Figura 7. Secuencia de la burbuja de dióxido de carbono en agua a 3 MPa y 30 °C

En la Figura 8 se muestra como se traduce ese cambio en la forma y tamaño de la burbuja en la tensión interfacial a las condiciones de 30 °C para las presiones de 2 y 3 MPa. A medida de que el tiempo transcurre la tensión interfacial del sistema CO₂-agua va disminuyendo hasta llegar al valor de equilibrio de 29,74 mN/m para 2 MPa y 26,61 mN/m para 3 MPa. Nótese que la tensión interfacial disminuye al aumentar la presión del sistema.

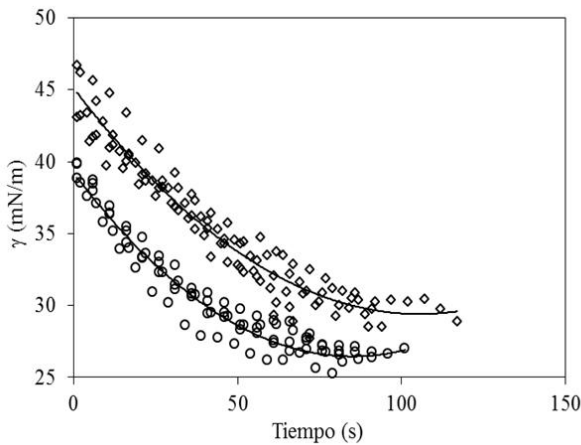


Figura 8. Variación de la tensión interfacial de la burbuja de CO₂ en agua a 30 °C con respecto al tiempo a diferentes presiones (◆ 2 MPa ● 3 MPa)

La Figura 9 muestra la variación de la tensión interfacial de equilibrio de las burbujas de dióxido de carbono en agua con respecto a la temperatura a las dos presiones estudiadas (2 y 3 MPa). Puede observarse que a diferencia de lo que ocurre con la presión, la tensión interfacial aumenta al incrementarse la temperatura.

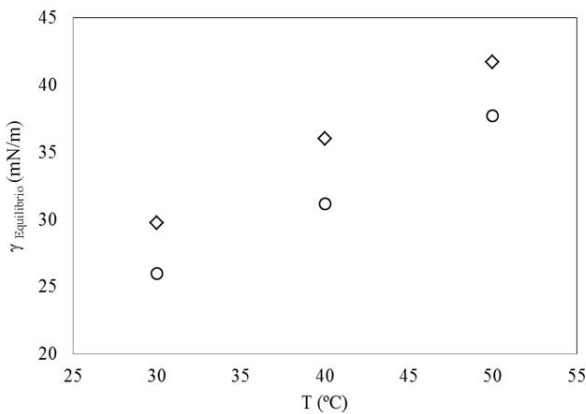


Figura 9. Comparación de la tensión interfacial dinámica para los sistemas agua-dióxido de carbono y dióxido de carbono-agua a las presiones de 2 y 3 MPa, y temperaturas entre 20 y 50 °C

La variación de la tensión interfacial de equilibrio mantiene una relación lineal con la temperatura del sistema, como puede observarse en la Figura 9.

Comparación de resultados

Si el sistema bajo estudio se comportase como uno ideal, se esperaría que los valores de la tensión interfacial fueran iguales para las configuraciones de gota colgante (sistema agua-CO₂) y de burbuja emergente (CO₂-H₂O). Los resultados presentados en la figura 10 muestran lo contrario.

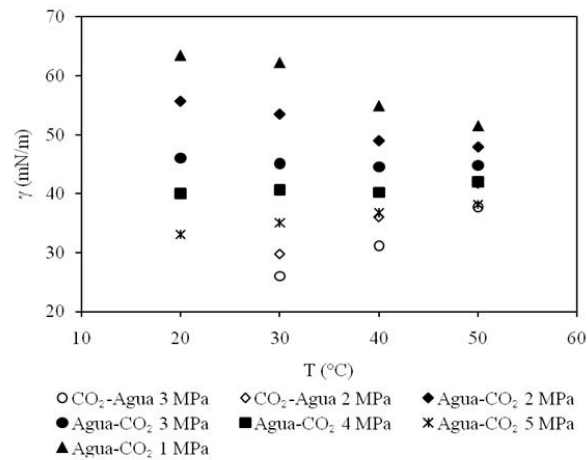


Figura 10. Comparación de la tensión interfacial dinámica para los sistemas agua-dióxido de carbono y dióxido de carbono-agua a las presiones de 2 y 3 MPa, y temperaturas entre 20 y 50 °C

Los valores de tensión interfacial de equilibrio para la configuración de la gota (agua como fase dispersa) son mayores que para la burbuja emergente (CO₂ como fase dispersa) para todo el rango de presiones y temperatura estudiando. Este resultado se debe al comportamiento no ideal que presenta el sistema estudiado en las condiciones de operación seleccionadas. Se conoce que a las presiones de trabajo el dióxido de carbono es soluble en el agua y provoca en ella un hinchamiento (*swelling*) por lo que el equilibrio de fuerzas en la superficie gas-líquido presenta un comportamiento diferente dependiendo de cuál sea la fase dispersa y del sentido del flujo difusivo entre las dos fases.

También puede observarse que las tendencias de variación de estos valores con la temperatura también son diferentes, mientras que para la gota la tensión interfacial de equilibrio disminuye con la temperatura a las presiones de 2 y 3 MPa, en el caso de la burbuja emergente aumentan. El comportamiento con la presión es similar, es decir que al aumentar la presión del sistema, la tensión interfacial de

equilibrio disminuye tanto para la gota colgante como para la burbuja emergente.

CONCLUSIONES

La tensión interfacial dinámica se comporta de manera diferente para las dos configuraciones y condiciones de operación estudiadas en este trabajo. Los valores de tensión interfacial de equilibrio para la configuración de la gota (agua como fase dispersa) son mayores que para la burbuja emergente (CO₂ como fase dispersa) para todo el rango de presiones y temperatura estudiando. Se presume que este resultado se debe al comportamiento no ideal que presenta la mezcla de dióxido de carbono en agua a las condiciones de operación seleccionadas. Se descarta que estas diferencias se deban a errores experimentales de la técnica seleccionada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Decanato de Investigaciones y Desarrollo por el financiamiento parcial de este trabajo de investigación a través del Grupo de Investigación G10. Al Laboratorio de Fenómenos de Transporte de la Universidad Simón Bolívar. También a Victoria Coll y Ana Borges por su ayuda en las etapas preliminares del trabajo experimental.

REFERENCIAS

- ADAMSON, A. W. & GAST, A. P. (1997). *Physical Chemistry of Surfaces*, 6th Ed., John Wiley & Sons Inc., New York.
- AGUILERA, M., CERRO, R., LÓPEZ DE RAMOS, A. L. (2002). Enhanced CO₂ diffusion in wedges, *Chemical Engineering Journal*: 87, 31-40.
- AGUILERA, M. & LÓPEZ DE RAMOS, A. L. (2004). Effect of CO₂ diffusion on wettability for hydrocarbon-water-CO₂ systems in capillaries, *Int. Comm. Heat Mass. Transfer*: 31 (8), 1115-1122.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERILIAS (ASTM), Standard specification for pressure vessel plates, A 736/A 736M – 88.
- CHALBAUD, C., ROBIN, M., LOMBARD, J-M., MARTIN, F., EGERMANN, P., BERTIN, H. (2009). INTERFACIAL TENSION MEASUREMENTS AND WETTABILITY EVALUATION FOR GEOLOGICAL CO₂ STORAGE “, *Advances in Water Resources* 32, 98-109.
- CHUN, B. & WILKINSON, G. (1995). Interfacial tension in high-pressure carbon dioxide mixtures, *Ind. Eng. Chem. Res.*: 34, 4371-4377.
- FARIÑAS, J., BLANCO, P., LEDANOIS, J. L., LÓPEZ DE RAMOS, A. L. (1998). Determinación de la tensión superficial mediante digitalización de imágenes de la gota colgante, *Información Tecnológica*: (9), 1, 167-173.
- FUENTES, J. & LÓPEZ DE RAMOS, A. L. (2001). A new method for the determination of surface tension using the pendant drop technique, *Tecnología de Información*: (2), 2, 181-188.
- HEBACH, A., OBERHOF, A., DAHMEN, N., KÖGEL, A., EDERER, H., DINJUS, E. (2002). Interfacial tension at elevated pressures measurements and correlations in the water + carbon dioxide system, *J. Chem. Eng. Data*: 47, 1540-1546.
- HEBACH, A., MARTIN, G., KÖGEL, A., DAHMEN, N. (2005). Interfacial tension during mass transfer of CO₂ into water in a water-saturated CO₂ atmosphere at 298 K and 6.6 MPa, *J. Chem. Data*: 50, 403-411.
- JAEGER, P., EGGERS, R. (2009). Interfacial tension of ionic liquids at elevated pressures, *Chemical Engineering and Processing*: 48, 1173-1176.
- KVAMME, B., KUZNETSOVA, T., HEBACH, A., OBERHOF, A., LUNDE, E. (2007). Measurements and modelling of interfacial tension for water + carbon dioxide systems at elevated pressures, *Computational Materials Science*: 38, 506-513.
- LÓPEZ DE RAMOS A., REDNER R. A., CERRO R. L. (1993). Surface tension from pendant drop curvature, *Langmuir*: 9, 3691-3694.
- LÓPEZ DE RAMOS A. L. (1993). Capillary enhanced diffusion of CO₂ in porous media, PhD. Dissertation, The University of Tulsa.
- LÓPEZ DE RAMOS A. L. & ZEPPIERI, S. (2005). Thermal conductivity and surface tension experimental values for the three alcohol binary mixtures: heptanol-octanol, heptanol-nonanol and octanol-nonanol, *Proceedings of 7th World Congress of Chemical Engineering*, Glasgow, Scotland.

- MELÉNDEZ, J. (2007). Determinación de la Tensión Interfacial Dinámica y la Difusividad por el Método de la Gota Colgante, Tesis de Maestría, Universidad Simón Bolívar.
- MIQUILENA, A., COLL, V., BORGES, A., MELÉNDEZ, J., ZEPPIERI, S. (2010). Influence of Drop Growth Rate and Size on the Interfacial Tension of Triton X-100 Solutions as a Function of Pressure and Temperature, *International Journal of Thermophysics*: 31, 11-12, 2416-2424.
- REN, Q., CHEN, G., YAN, W., GUO, T. (2000). Interfacial tension of (CO₂ + CH₄) + water from 298 K to 373 K and pressures up to 30 MPa, *J. Chem. Eng. Data*: 45, 610-612.
- TEWES, F., BOURY, F. (2004). Thermodynamic and dynamic interfacial properties of binary carbon dioxide-water systems, *J. Phys. Chem. B*: 108, 2405-2412.
- YANG, D., TONTIWACHWUTHIKUL, P., GU, Y. (2006). Dynamic interfacial tension method for measuring gas diffusion coefficient and interface mass transfer coefficient in a liquid, *Ing. Eng. Chem. Res.*: 45, 4999-5009.
- ZEPPIERI, S., RODRIGUEZ, J., LÓPEZ DE RAMOS A. L. (2001). Interfacial tension of alkane+water systems, *Journal of Chemical and Engineering Data*: (46), 5, 1086-1088.
- ZEPPIERI, S., RAMÍREZ, Y., MOLINA, J., LÓPEZ DE RAMOS A. L. (2009). Estudio experimental de la tensión interfacial transitoria para sistemas alcanos-agua-Tritón X-100 empleando la técnica de la gota emergente, *Información Tecnológica*: 20, 6, 125-135.
- ZEPPIERI, S. & LÓPEZ DE RAMOS A. L. (2009). Determinación de la tensión superficial para el sistema alcano/aire y alcohol/aire mediante la técnica de la gota colgante: correlación para alcanos y alcoholes, *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*: 24, 2, 71-77.