



Estudio hidrodinámico de tanques agitados con varios impulsores excéntricos

Hydrodynamic Studies for stirred tanks by multiple eccentric impellers

Ramiro Rivera-Aguilera*, Agustín R. Uribe-Ramírez

Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, 36050 Guanajuato, Gto. México,

**E-mail: agustin@ugto.mx*

Abstract

A numerical study on the hydrodynamics of stirred tanks in multiphase systems using one or more eccentric agitators mounted on a single axis is presented. For this study we used the RSM turbulence model (Reynolds Stresses Model) using the commercial CFD program Fluent v6.3.26 ANSYS, Inc.

Keywords: *Eccentric Stirrer, CFD, Hydrodynamics.*

Resumen

Se presenta un estudio numérico sobre la hidrodinámica de tanques agitados en sistemas multifásicos utilizando uno o varios agitadores excéntricos montados sobre un mismo eje. Para realizar este estudio se utilizó el modelo de turbulencia RSM (Modelo de los esfuerzos de Reynolds) utilizando el programa comercial de CFD Fluent v6.3.26 de ANSYS, Inc.

Palabras clave: *Agitación Excéntrica, CFD, hidrodinámica*

Introducción

Las simulaciones numéricas de flujos utilizando Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) han ganado una aceptación completa entre la comunidad científica como una herramienta para investigar los patrones de mezclado en recipientes agitados. Muchos estudios se enfocan en la complejidad de la hidrodinámica generada por el impulsor rotatorio a viscosidades altas o con fluidos

reológicamente complejos. Simulaciones de la mezcla de flujos se han llevado a cabo basadas en el método del volumen finito o del elemento finito para efectuar la resolución de las ecuaciones clásicas de conservación en forma conjunta con las mallas, sean estas móviles o deslizantes, para mostrar la cinemática del impulsor relativa al tanque del recipiente y sus internos.



La agitación y mezclado es una operación unitaria presente en la gran mayoría de procesos industriales, cualquiera que sea su giro. Esta operación involucra sistemas de una sola fase o de varias fases líquidas, sólidas y gaseosas y se puede realizar en mezcladores estáticos o en sistemas agitados. En la gran mayoría de los trabajos reportados en la literatura sobre el mezclado, se hace mención a la agitación con el eje de agitación colocado en el centro del recipiente. Así pues, hay un cierto déficit en cuanto a la disponibilidad de datos referentes a la agitación excéntrica para flujos turbulentos, aun cuando es este el modo de operación sugerido en la práctica industrial como una alternativa a la utilización de baffles para romper el vórtice principal. Estos tanques agitados tienen numerosas aplicaciones industriales; por mencionar algunas: la síntesis química, fermentación aerobia, tratamiento de efluentes y de aguas de desecho, fabricación de pinturas, procesamiento de alimentos, medicinas, etc. Esto aún cuando los estudios sobre la agitación excéntrica tienen ya muchas décadas de haberse iniciado; sin embargo, la mayoría de esos trabajos efectuados tratan sobre parámetros globales, como: el tiempo de mezclado, el número de potencia o el número de caudal.

Esta manera diferente de efectuar la agitación en tanques agitados es, a menudo, utilizada en configuraciones de uno o múltiples impulsores agrupados en un eje común a fin de intensificar el contacto entre las fases. Comparados con los reactores con un solo agitador, las configuraciones de impulsores múltiples exhiben numerosas ventajas, tales como: una mejor circulación del fluido en el recipiente, mejor distribución de la disipación de la energía, una mejor distribución del gas para sistemas gas-líquido y mayor tiempo de residencia en el recipiente, logrando con esto una mejor eficiencia de utilización del gas.

En las industrias de alimentos, pinturas o químicas, los tanques agitados sin baffles con ejes del impulsor colocados excéntricamente pueden utilizarse en lugar de tanques con baffles. La excentricidad se ha encontrado que es equivalente a colocar baffles cuando la ubicación excéntrica del impulsor maximiza el consumo de potencia (Dylag, 1976; Medek, 1985; Tatterson, 1991). Sin embargo, otras características del mezclado para la posición excéntrica no han sido estudiadas suficientemente aún. El efecto de la distancia libre al fondo del recipiente del impulsor en el consumo de potencia fue estudiado por King y Muskett en 1985. En el año 2000, Seichter et al. efectuaron investigaciones de las características del mezclado para el caso de un tanque agitado con impulsor axial excéntrico.

En el diseño del mezclado, los impulsores colocados excéntricamente son utilizados en algunas ocasiones para limitar la formación de cavernas en la ausencia de baffles. La simulación del flujo en recipientes excéntricos impone retos numéricos especiales, pues al no tener condiciones de simetría que usar para simplificar la resolución, deben resolverse las ecuaciones de conservación en estado no estacionario y es requerida una nueva malla computacional previamente con cada paso de tiempo, lo que es una desventaja en términos de esfuerzo de cómputo.

Algunos aspectos importantes relativos al mezclado en régimen laminar del flujo de líquido en tanques agitados con impulsor excéntrico fueron discutidos por Alvarez (2000), Alvarez, et al. (2002) y Ascanio, et al. (2002). Alvarez, et al. (2002) utilizaron la técnica de visualización de un trazador y el método de fluorescencia inducida por láser para el estudio de la estructura de flujo laminar y patrones de mezclado en un tanque



agitado con una turbina Rushton colocada excéntrica. Observaron que la excentricidad del impulsor afecta significativamente la estructura múltiple de flujo del fluido, lo que se refleja en la destrucción de las regiones segregadas de movimiento regular e incrementa la circulación axial del fluido en el tanque. Ascanio et al. (2002) investigaron el tiempo de mezclado con fluidos viscosos agitados por medio de impulsores sencillos o dobles colocados excéntrica. También se consideró el efecto de las perturbaciones dinámicas en la homogeneización del líquido en tales tanques agitados. Los resultados de sus estudios revelaron que los tiempos de mezclado se reducen y se mejora la homogeneización del fluido newtoniano al utilizar impulsores excéntricos, en ese caso, la turbina Rushton e impulsor hydrofoil.

Ascanio et al. (2010), comentan que a pesar del beneficio que provee el desplazar el impulsor a una posición excéntrica al promover una perturbación geométrica, la información sobre la hidrodinámica de recipientes agitados sin baffles utilizando impulsores colocados axialmente en el régimen laminar que se encuentra disponible en la literatura es escasa. En su trabajo utilizaron una turbina Rushton y un impulsor PBT de 4 aspas de manera individual colocados alternativamente en posición excéntrica y caracterizando los perfiles formados por visualización de flujo utilizando técnicas de velocimetría de imagen de partículas (particle image velocimetry, PIV), desarrollando un método alternativo para la determinación del número de bombeo.

En la bibliografía consultada la mayor cantidad utilizada de impulsores excéntricos en sus trabajos es dos, ya sean del mismo tipo (Rushton, FBT, PBT, Smith, A315) o combinaciones entre ellos sin variar su altura de colocación y a lo más colocan un segundo eje excéntrico en el recipiente (Ascanio 2006, Tanguy 2008) mientras que en este estudio se utilizaron exclusivamente impulsores PBT @ 45° de 6 aspas variando su altura de colocación sobre un eje excéntrico así como

el numero de agitadores a colocar hasta un máximo de 3.

El principal objetivo de este trabajo es el estudio del efecto que tiene sobre el mezclado, (tiempo de mezclado y eliminación de regiones segregadas), la colocación a diferentes alturas del impulsor así como de la colocación de múltiples impulsores todos los casos ubicados sobre un solo eje colocado excéntrica en un tanque agitado sin baffles.

Metodología

Para describir el flujo del fluido y su proceso hidrodinámico dentro del tanque, se utilizó el código comercial de dinámica de fluidos computacional (CFD), Fluent de ANSYS. Este programa modela el flujo basado en las ecuaciones de Navier-Stokes para la conservación de la masa (Ecuación 1), la conservación del momento (Ecuación 2) y de la energía (Ecuación 3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (3)$$

En estas ecuaciones S_m es un término fuente, $\vec{\tau}$ es el tensor de esfuerzos \vec{g} es la fuerza gravitacional y \vec{F} son las fuerzas externas al cuerpo, ρ , \vec{v} y p son la densidad, velocidad y presión respectivamente. En la ecuación (3), k_{eff} es la conductividad efectiva, y \vec{j}_j es el flujo de difusión de la especie j . Los términos a la derecha en la ecuación (3) representan la transferencia de energía debida a la conducción, difusión de especies y disipación viscosa respectivamente, S_h incluye el calor debido a la reacción química y otras posibles fuentes volumétricas de calor



que se hayan definido, por ejemplo, el calor liberado durante el crecimiento de las partículas.

Uno de los modelos que se utilizan para modelar la turbulencia es el Modelo de los Esfuerzos de Reynolds (RSM) y es el modelo de turbulencia más elaborado que ofrece el FLUENT. Como cerradura para las ecuaciones de Navier-Stokes, el RSM resuelve las ecuaciones de transporte para los esfuerzos de Reynolds junto con una ecuación para la velocidad de disipación. Esto implica que se requiere resolver cinco ecuaciones adicionales para flujos en 2D y siete para el caso de 3D. Puesto que el RSM toma en cuenta los efectos de la curvatura de la línea de corriente, giro, rotación y cambios rápidos en la razón de esfuerzo en una forma más vigorosa que los modelos de una o dos

ecuaciones, tiene un gran potencial para dar predicciones precisas para flujos complejos.

Aunque no siempre este modelo brinda resultados que sean claramente superiores a los de modelos más simples en cualquier clase de flujos para garantizar el gasto extra computacional. Sin embargo, su uso es recomendado cuando las características del flujo de interés son el resultado de la anisotropía en los esfuerzos de Reynolds. Entre los ejemplos se encuentran los flujos en los ciclones, combustores, pasajes de flujo rotatorios y flujos secundarios con esfuerzos inducidos en ductos.

Las ecuaciones de transporte en su forma exacta para el transporte de los esfuerzos de Reynolds $\overline{\rho u_i u_j}$, pueden escribirse como sigue:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho u_k u_i u_j}) = & \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u_i u_j u_k} + p(\overline{\delta_{ij} u_k} + \overline{\delta_{ik} u_j}) \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j}) \right] - \rho \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \\ & - \rho \beta (g_i \overline{u_j \theta} + g_j \overline{u_i \theta}) + p \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} - 2\rho \Omega_k (\overline{u_j u_n} \varepsilon_{ikn} + \overline{u_i u_n} \varepsilon_{jkn}) + S_{user} \end{aligned} \quad (4)$$

Las simulaciones se llevaron a cabo usando un modelo en 3D de tanque agitado similar al de la Figura 1a, con dimensiones T=0.3 m y H= 1.0 m. El nivel del líquido se mantuvo a 0.9 m para todas las pruebas. El eje, que en todas las corridas se hizo girar a 300 rpm, se colocó de manera excéntrica, a una distancia E = T/4 del centro del tanque. Al recipiente se le hicieron diferentes cambios en cuanto a la altura a la que se colocó el agitador sobre el eje y al número de agitadores utilizados.

Como impulsor de trabajo para todos los casos se utilizó el PBT (turbina de paletas inclinadas) de 6 aspas a 45° con D = T/3, según se muestra en la Figura 1b.

En las figuras 2 y 3 se muestran algunas de las posiciones para la colocación del impulsor utilizadas en las simulaciones:

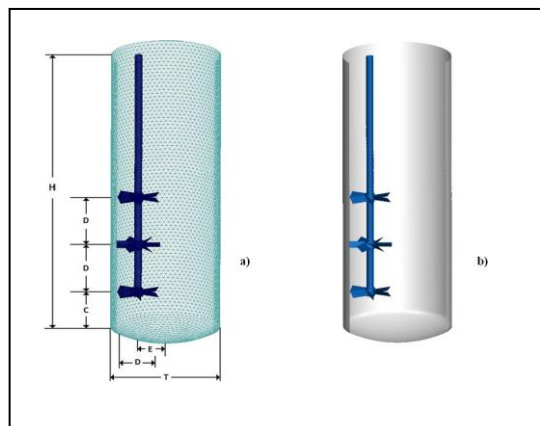
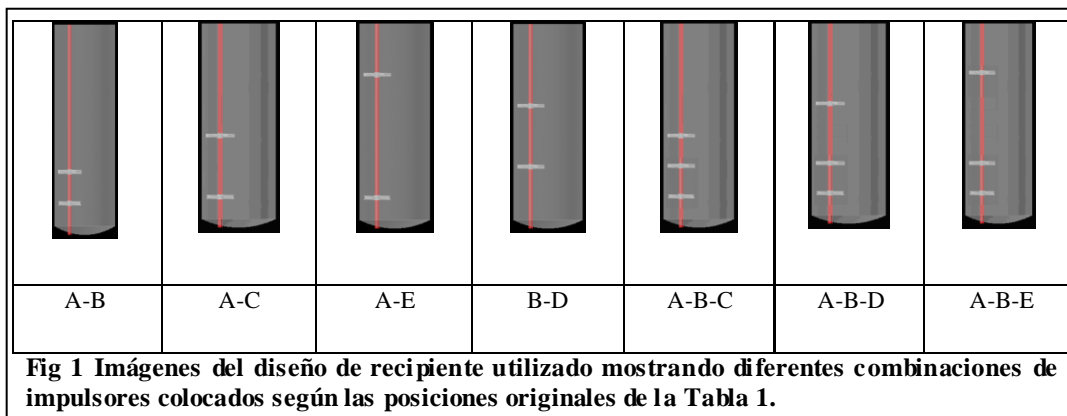
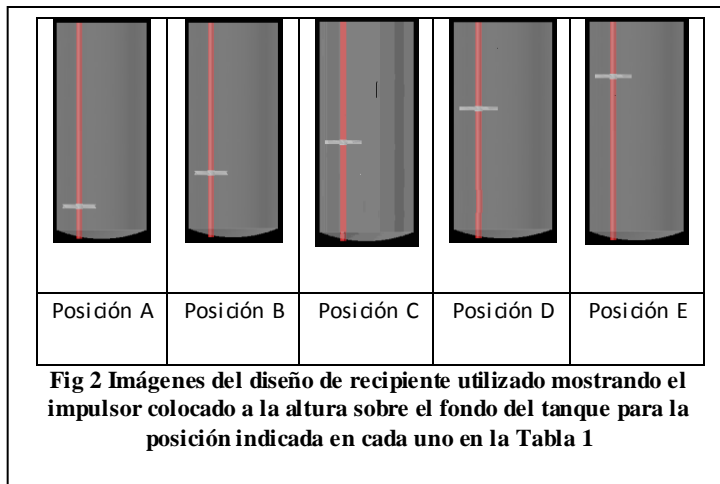


Figura 1a y 1b. En la figura 1a) se muestra la geometría en 3D con la malla de uno de los casos analizados en el cual se colocaron tres impulsores del tipo PBT @ 45° de seis aspas. En la figura 1b) se observan tres impulsores colocados sobre su eje, para facilitar la visualización se muestran sin una sección de la pared del tanque



Tabla 1 Posición de los agitadores utilizados sobre el eje

Posición	Altura sobre el fondo del tanque (m)
A	0.15
B	0.30
C	0.45
D	0.60
E	0.75



Resultados y Discusión

En las imágenes de la tabla 4 se observa que las mejores ubicaciones para un solo impulsor son las que se muestran en los casos “B” y “D” pues al no estar colocados demasiado cerca del extremo del recipiente (su ubicación es a 30 cm del fondo para el caso “B” y de 30 cm debajo del borde para el caso “D”), su efecto sobre el fluido es más evidente pues provoca un mayor movimiento en las fases lo que se traduce en un mejor mezclado en menor tiempo, la diferencia entre estos dos casos además de la altura de colocación es la dirección de giro

del agitador, pues el caso “B” impulsa el fluido hacia arriba y el “D” hacia abajo. Respecto a los casos “A” y “E” podemos decir que su efecto es bastante pobre pues aún al tiempo de 16 seg no se observa un gran avance en el mezclado de las fases y por el contrario su efecto solo se manifiesta en la zona cercana a la ubicación del agitador quedando el extremo opuesto al agitador dentro del tanque sin alteración aparente. Con respecto al caso “C” su zona de acción se limita al centro del recipiente y los extremos no manifiestan perturbación.

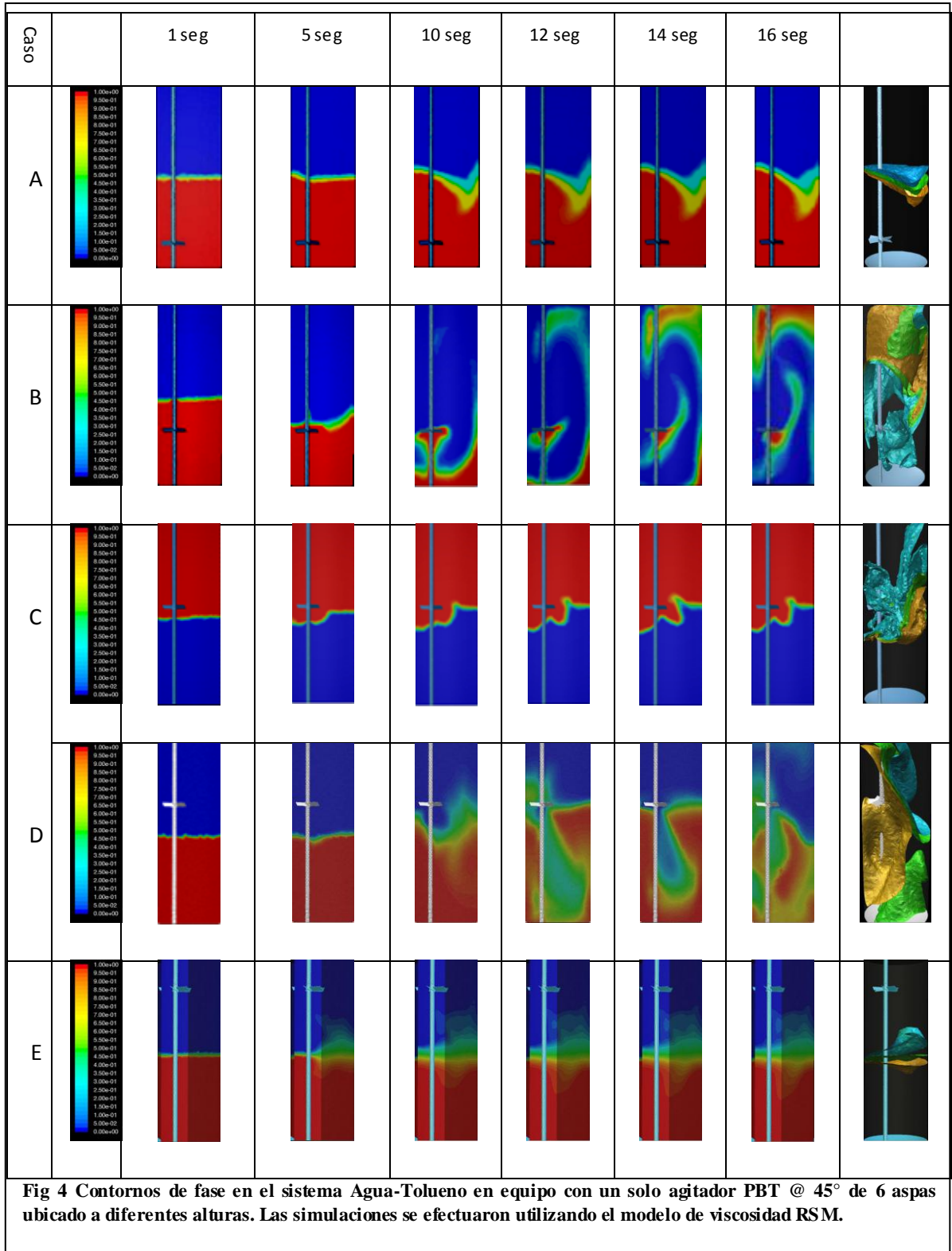


Fig 4 Contornos de fase en el sistema Agua-Tolueno en equipo con un solo agitador PBT @ 45° de 6 aspas ubicado a diferentes alturas. Las simulaciones se efectuaron utilizando el modelo de viscosidad RSM.



En los casos de sistemas con dos impulsores de la Figura 5 se encontró que de los cuatro analizados el que presenta un mejor comportamiento es el caso “A-E” pues al tiempo de solo 6 seg muestra que los contornos de fases se encuentran con valores cualitativos que sugieren un valor promedio de 0.5 en la totalidad del recipiente faltando poco por mezclar en los extremos, le sigue el caso “A-B” en donde la parte inferior del recipiente muestra solo una pequeña cantidad

de fase a mezclar al tiempo de 9 seg, misma que casi desaparece a los 12 seg. Le sigue el caso “A-C” en donde aún cuando no es un mal sistema de mezcla, le falta aún más tiempo para alcanzar el grado de mezclado de los dos casos anteriores. Por último, como opción no recomendable, el caso “B-D” en el que los dos impulsores se colocan casi en la parte central del tanque y no promueven que la acción del agitador llegue hasta los extremos del tanque.

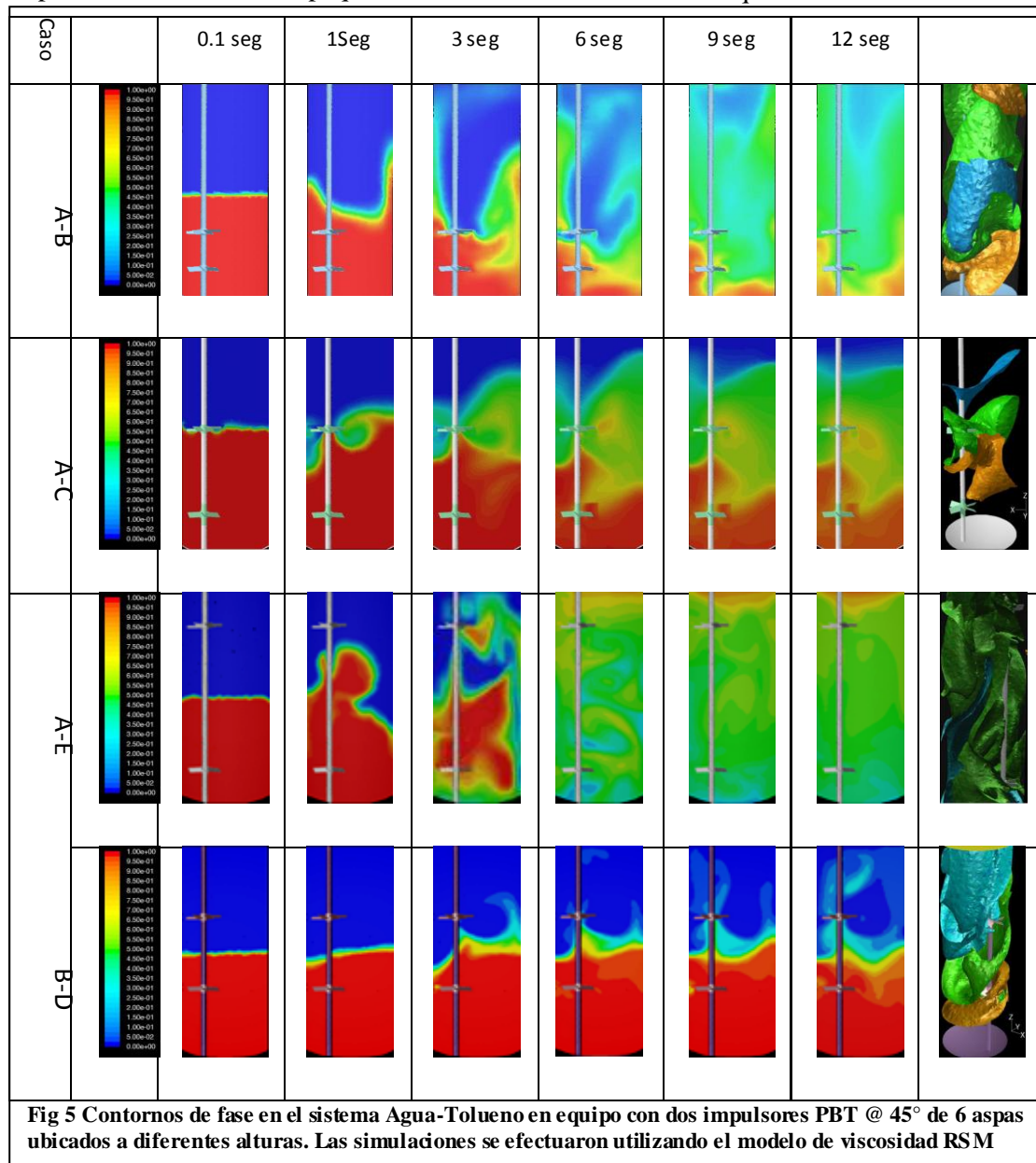


Fig 5 Contornos de fase en el sistema Agua-Tolueno en equipo con dos impulsores PBT @ 45° de 6 aspas ubicados a diferentes alturas. Las simulaciones se efectuaron utilizando el modelo de viscosidad RSM



Para los casos de sistemas con tres impulsores de la Fig 6, en base a los resultados se mostró que el mejor sistema de los que se simularon fue el “A-B-D” pues mostró que en relativamente poco tiempo (6 seg) fue capaz de homogeneizar casi por completo el contenido del tanque encontrándose apenas una pequeña zona faltante por mezclar en los extremos superior e inferior del recipiente, le sigue el caso “A-

B-E” el cual es el segundo mejor pues aún cuando no se encontró completamente mezclado al tiempo de 12 seg, el aspecto cualitativo nos indica que no está muy alejado del mezclado completo . Por último, el caso “A-B-C” el cual aún al tiempo de 12 seg no mostró avance alguno en el mezclado, habiéndose repetido el experimento invirtiendo el sentido de giro y tampoco reportó mejores resultados.

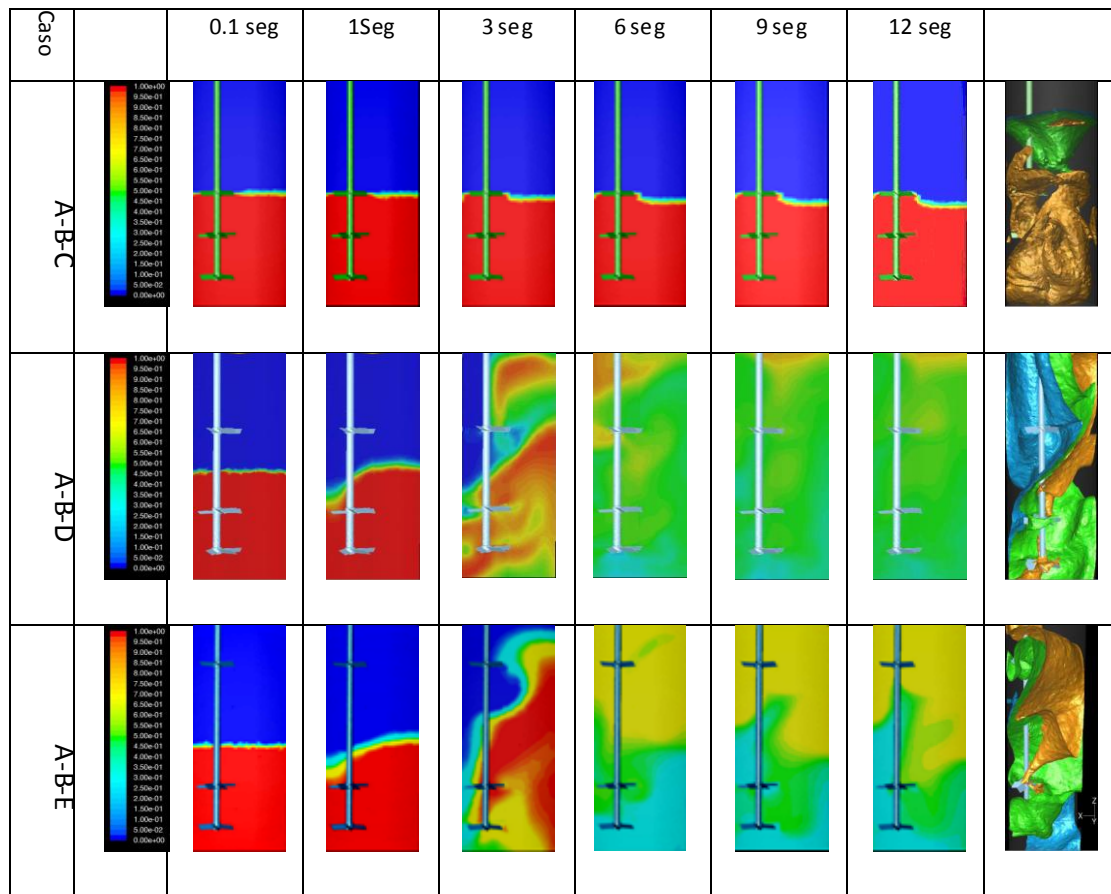


Fig. 6 Contornos de fase en el sistema Agua-Tolueno en equipo con tres impulsores PBT ubicados a diferentes alturas. Las simulaciones se efectuaron utilizando el modelo de viscosidad RSM

Conclusiones

De los sistemas simulados se encontró que para el caso de un solo impulsor las ubicaciones recomendables serían las posiciones “B” y “D” pues en éstas se muestra que el fluido contenido en el recipiente tiene un grado de avance mayor puesto que las dos fases ya no se encuentran claramente definidas como cuando inicio el experimento, como segunda opción podría pensarse en los casos “A” y “E” aunque al estar ubicado el impulsor en el extremo del tanque la acción sobre el resto del volumen es muy poca. Como una alternativa a descartar queda el caso “C” pues en este el efecto del agitador solo se hace manifiesto en la parte central del tanque no alterando las zonas extremas (parte superior y parte inferior del recipiente).

De las simulaciones efectuadas con dos impulsores se encuentra que la combinación recomendable es aquella del caso “A-E” pues según las imágenes de la tabla 5 se tiene un mezclado con buena calidad a un tiempo relativamente corto y también de acuerdo con los resultados obtenidos se afirma que en el caso “B-D” es una opción no adecuada.

Por último, para los casos de tres impulsores, se encontró como mejor caso el “A-B-D”, le siguió el “A-B-E” y por último el “A-B-C”.

Con esto es posible afirmar que las mejores ubicaciones que se encontraron para sistemas excéntricos de un solo impulsor en un recipiente alto son las que se ubiquen a una distancia entre D y 2D del fondo.

Parte de la razón para este comportamiento en conjunto de los impulsores se debe a que sus perfiles de flujo característicos que tienen al encontrarse operando individualmente, al estar en un sistema de agitadores múltiples, esos perfiles tienen un efecto aditivo, el cual en ocasiones no favorece la circulación del fluido a

mezclar por todo el tanque encontrándose ciertas ubicaciones segregadas.

Referencias

Hall, J.F., Barigou, M., Simmons, M.J.H., Stitt, E.H., (2004), Mixing in unbaffled high-throughput experimental reactors, *Ind Eng Chem Res*, 43, 4149–4158.

J. Karcz And J. Szoplik, (2004), An Effect of the Eccentric Position of the Propeller Agitator on the Mixing Time, *Chemical Papers* 58(19)|14.

G. Ascanio, S. Foucault, M. Heniche, C. Rivera and P.A. Tanguy, (2005), Chaotic mixing in stirred vessels; A new strategy to enhance homogeneity, *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*, Vol 1 No 6, pag. 209-214.

J. Karcz, M. Cudak, J. Szoplik, (2005), Stirring of a liquid in a stirred tank with an eccentrically located impeller, *Chemical Engineering Science*, Volume 60, Issue 8-9, Apr-May 2005, P 2369-2380.

G. Montante, A. Bakker, A. Paglianti, F. Magelli, (2006), Effect of the shaft eccentricity on the hydrodynamics of unbaffled stirred tanks, *Chemical Engineering Science* 61 (2006) 2807 – 2814.

P.A. Tanguy, (2008), Gas-liquid mass transfer in unbaffled dual-impeller mixers, *Chemical Engineering Science*, Volume 63, Issue 6, P 1636-1647.

C. Galletti, E. Brunazzi, (2008), On the main flow features and instabilities in an unbaffled vessel agitated with an eccentrically located impeller, *Chemical Engineering Science*, Volume 63, Issue 18, Pages 4494-4505

C. Galletti, S. Pintus, E. Brunazzi, (2009), Effect of shaft eccentricity and impeller blade thickness on the vortices features in an unbaffled vessel, 13th European Conference on Mixing London, 14-17 April 2009.

Szymon Woziwodzki, Lubomira Broniarz-Press, Marek Ochowiak, (2010), Effect of eccentricity on transitional mixing in vessel equipped with turbine impellers, *Chemical Engineering Research and Design* 88, 1607–1614.

Magdalena Cudak, Joanna Karcz, Anna Kielbus-Rapala, (2010), Transport phenomena in an agitated vessel with an eccentrically located impeller, *Chemical Papers* 65 (2) 147–155.

Hidalgo-Millán, A., Soto, E., Zenit, R. and Ascanio, G., (2010), Effect Of Eccentricity On The Pumping Capacity In An Unbaffled Vessel, *Mixing XXII North American Mixing Forum* June 20 – 25, 2010.

Szymon Woziwodzki*, Łukasz Jędrzejczak, (2011), Effect of eccentricity on laminar mixing in vessel stirred by double turbine impellers, *Chemical Engineering Research and Design* 89 (2011) 2268–2278.