



## AGITACION Y MEZCLADO

### STIRRING AND MIXING

**Agustín R. Uribe Ramírez, Ramiro Rivera Aguilera, Alberto F. Aguilera Alvarado y Edilberto Murrieta Luna**

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

#### Resumen

En este trabajo se presenta la simulación del comportamiento de tanques agitados con diferentes tipos de impulsores y con más de un impulsor en el mismo eje usando técnicas de CFD. Se presenta claramente la diferencia en los patrones de agitación en los diferentes casos, lo cual es muy importante en el diseño de operaciones de mezclado.

**PALABRAS CLAVE:** *Agitación, Mezclado, CFD, Múltiples Impulsores, Tanques Agitados.*

#### Abstract

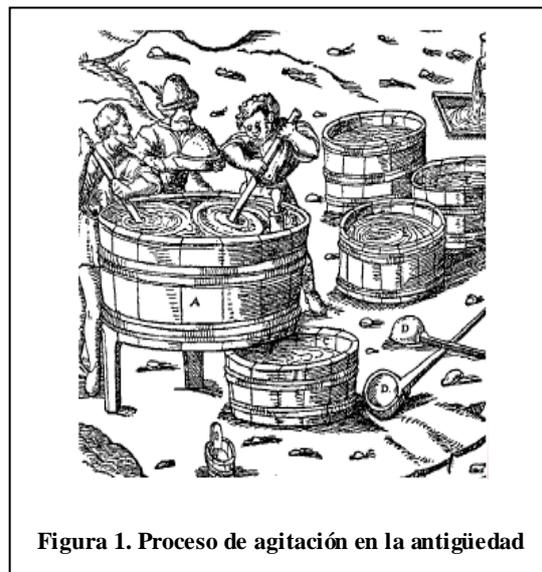
The simulation of the behavior of stirred tanks with different types of impellers and more than one impeller on the same axis, using CFD techniques, is presented in this paper. It is clearly observed the difference in the agitation patterns for the different cases, which is very important in the design of blending operations.

**KEYWORDS:** *Stirring, Mixing, CFD, Multiple Impellers, Stirred Tanks*

*Recibido 15 de Diciembre del 2011, Publicado Mayo del 2012*

#### Introducción:

La agitación y mezclado es una operación unitaria presente en la gran mayoría de los procesos industriales. 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. Por su importancia, la agitación y el mezclado se han estudiado desde los comienzos de la civilización, cuando la humanidad tuvo necesidad de mezclar alimentos, tintas, materiales ornamentales, arcilla, etc. y su diseño inicialmente respondía más a la necesidad de dispersar las diferentes sustancias presentes en una mezcla, que a lograr un mezclado eficiente. Sería muy difícil encontrar dentro de los procesos industriales un proceso que no involucre de alguna manera u otra un proceso de mezclado, ya sea para promover



**Figura 1. Proceso de agitación en la antigüedad**

la homogeneización de las fases, mejorar el contacto entre los reactivos en reactores agitados, dispersar aire en caldos de cultivo,

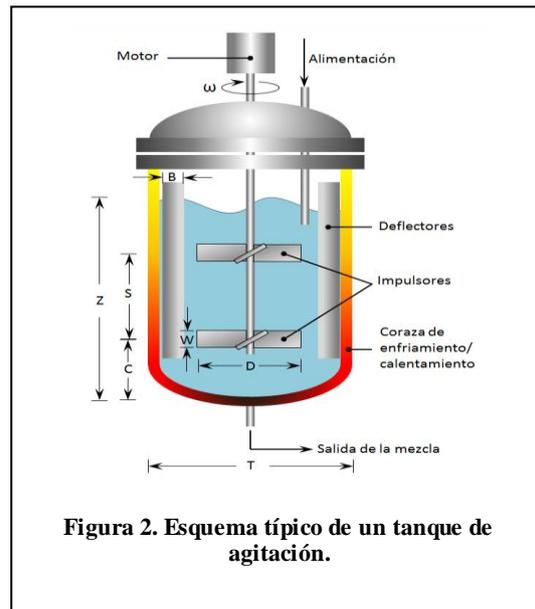


agilizar la rapidez de transferencia de calor en el caso de recipientes con calentamiento externo, realizar operaciones de lixiviación de sólidos y una larga lista más de casos en donde la utilización de tanques agitados es parte fundamental y central del proceso productivo. Incluso, pudiera decirse que el éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos (McCabe, et al., 2007).

Diferentes aplicaciones requerirán de diferentes maneras de agitar los fluidos dentro de los tanques. El éxito de la operación de mezclado dependerá grandemente de un diseño apropiado de los elementos internos y, principalmente, del tipo de impulsor que se utilice. Actualmente se comercializan varios tipos de impulsores diseñados para diferentes aplicaciones específicas o genéricas por parte de varias compañías que tienen las patentes de explotación de sus diseños.

Durante muchos años, el diseño de los tanques de agitación se ha realizado de forma empírica, tomando en cuenta aspectos como: la potencia requerida, el corte que se realiza en el fluido, el bombeo, el tiempo de mezclado y los patrones de flujo. La medición de estos parámetros se logra principalmente de manera experimental, utilizando modelos a escala en tanques de material transparente (principalmente de vidrio) que permite observar el comportamiento del fluido ante las diferentes condiciones de la agitación. Sin embargo, es bastante difícil lograr observar los patrones de flujo y determinar el grado de homogeneización y el tiempo de mezclado debido a la rapidez con que este sucede y a la dificultad de realizar las observaciones y mediciones experimentales.

Las modernas herramientas computacionales y las nuevas técnicas numéricas hacen posible la predicción de los patrones de flujo y la hidrodinámica en una gran variedad de aplicaciones utilizando las herramientas de CFD (Computacional Fluid Dynamics). Dentro de las operaciones industriales se aprovechar la aplicación de esta tecnología.



Un diseño adecuado es el que combina todos estos factores y métodos de una forma eficiente de acuerdo a la aplicación específica que se requiera. En este trabajo se presenta la manera en cómo la tecnología CFD puede ayudar a la predicción del comportamiento de la agitación y mezclado en tanques agitados antes de, e incluso en lugar de, proceder a la construcción y diseño de tanques con aplicación industrial. Se utilizó en este trabajo el paquete comercial de CFD ANSYS Fluent v.14 que utiliza el método del volumen finito para la discretización del dominio físico. Se presentan algunos ejemplos de perfiles de distribución de velocidad y líneas de flujo utilizando diferentes tipos de impulsores, así como la utilización de varios impulsores del tipo de turbina de paletas inclinadas a 45° colocadas en el mismo eje.

### Definiciones:

Algunas definiciones útiles para presentar este trabajo son (Dickey y Fenic, 1976):

**Agitación:** Es la operación por la cual se crean movimientos violentos e irregulares en el seno de una materia fluida, o que se comporte como tal, situando las partículas o



moléculas de una o más fases de tal modo que se obtenga el fin pretendido en el mínimo de tiempo y con un mínimo de energía. En el caso de que no sea una única sustancia la que reciba este movimiento, sino dos o más sustancias, miscibles o no, se llamará mezcla. En ella se pretende realizar una distribución al azar de dichas sustancias o fases.

**Mezclado:** El término mezclado se refiere, en el contexto de la agitación, a conseguir la máxima interposición entre materiales, que pueden ser miscibles o no miscibles, para obtener un grado determinado de uniformidad entre los mismos.

**Número de Reynolds de mezclado:** Es la relación entre la fuerza de inercia característica de mezclado y la fuerza viscosa, definido como:

$$(1) Re = \frac{ND^2r}{m}$$

**Número de Froude:** Es la relación entre la fuerza de inercia de mezclado y la fuerza de gravedad, definido como:

$$(2) Fr = \frac{DN^2}{g}$$

El número de Froude es importante en situaciones donde existe la formación de vórtice en la superficie del líquido y puede ser despreciado generalmente cuando el número de Reynolds es menor a aproximadamente 300. Para números de Reynolds más altos, los efectos del número de Froude son eliminados con el uso de deflectores o de agitación excéntrica (Harnby, et al., 1992)

**Potencia de la agitación:** Para el diseño del tanque de agitación es fundamental conocer la potencia que se requiere suministrar al impulsor para lograr el grado de mezclado requerido. No es posible relacionar directamente la distribución de presión a lo largo del tanque con la potencia requerida para el diseño, por lo que se utiliza solamente una fracción de esta distribución, la que se encuentra alrededor de las aspas o paletas del

impulsor, a fin de obtener los requerimientos de potencia en el sistema de agitación.

De acuerdo a su definición, potencia de un sistema de agitación es el producto de la velocidad de rotación del impulsor,  $v = ND$ , y el torque aplicado,  $t \mu (p - p_0)_{aspa} D^2$ . Por lo tanto:

$$(3) P = tv \mu (p - p_0)_{aspa} ND^3$$

**Número de Potencia:** La presión característica en un sistema de agitación es la concentración de energía cinética que proporciona el impulsor, definida como:

$$p' = rv^2 \mu rN^2D^2.$$

La relación entre la caída de presión alrededor de un aspa o paleta y la presión característica, define el Número de Potencia, importante en la caracterización de la agitación y la determinación de los requerimientos de potencia, el cual representa la relación entre la fuerza suministrada al sistema y la fuerza de inercia.

$$N_p = \frac{(p - p_0)_{aspa}}{p'} = \frac{P}{rN^3D^5} \quad (4)$$

**Capacidad de Bombeo:** Se define como la cantidad de material líquido que sale en la descarga por la región del rotor del impulsor por unidad de tiempo. Esta cantidad es una característica importante del proceso y desempeña un papel importante cuando se calcula el tiempo de mezclado. Generalmente se mide de forma experimental mediante el uso de diversas técnicas (Foř, et al., 2002).

**Número de Bombeo:** La capacidad de bombeo de un impulsor se puede expresar de forma adimensional relacionándola con el flujo volumétrico característico del tanque de agitación, dando como resultado el número de bombeo o número de flujo:

$$(5) N_Q = \frac{Q_p}{ND^3}$$

**Eficiencia Hidráulica del impulsor:** La combinación de los números de potencia y de



bombeo y la relación geométrica adimensional ( $D/T$ ) da como resultado la eficiencia hidráulica del impulsor, que indica la capacidad de convertir la energía consumida por el impulsor en bombeo del material líquido:

$$(6) \quad E_P = \frac{N_Q^3}{N_P} \left( \frac{D}{T} \right)^4$$

**Tiempo de mezclado:** Es el tiempo requerido para lograr algún grado especificado de uniformidad después de la introducción de un trazador. Algunos métodos experimentales para calcular el tiempo de mezclado son: toma sencilla, introducción de tinta, celda de conductividad, indicador ácido-base, etc. (Hicks, et al., 1976). Estos métodos miden el tiempo de mezclado de diferentes maneras, por lo que el tiempo obtenido puede variar de un método a otro. Por esto, además de la dificultad de observar experimentalmente el grado de uniformidad, está sujeto a la buena manipulación y habilidad del investigador. Aquí, la simulación por computadora utilizando técnicas de CFD puede ser de gran ayuda y en principio puede substituir la experimentación completamente, logrando obtener resultados más rápidos, baratos y

sencillos, necesitando solamente la validación de los resultados numéricos.

Cuando los efectos de la gravedad son despreciables, el tiempo de mezclado adimensional,  $t_b^* = t_b N$ , es una función del número de Reynolds como sigue:

$$(7) \quad t_b^* \left( \frac{D}{T} \right)^n = f(Re)$$

Para los casos extremos (región viscosa,  $Re < 20$  ó región turbulenta,  $Re > 10,000$ ), los números adimensionales presentados arriba son prácticamente independientes del número de Reynolds. Para Reynolds intermedios ( $20 < Re < 10,000$ ) estos parámetros adimensionales dependen fuertemente del número de Reynolds (Hicks, et al., 1976)

## METODOLOGIA

En la Fig. 3 se muestra la geometría y el mallado del tanque de agitación utilizado para hacer las simulaciones del comportamiento hidrodinámico de diferentes impulsores. El tanque tiene un diámetro  $T = 1$  m y el líquido tiene una altura  $z = 1$  m. Los impulsores tienen todos un diámetro  $d = T/2$  colocados a una altura  $c = 0.3$  m

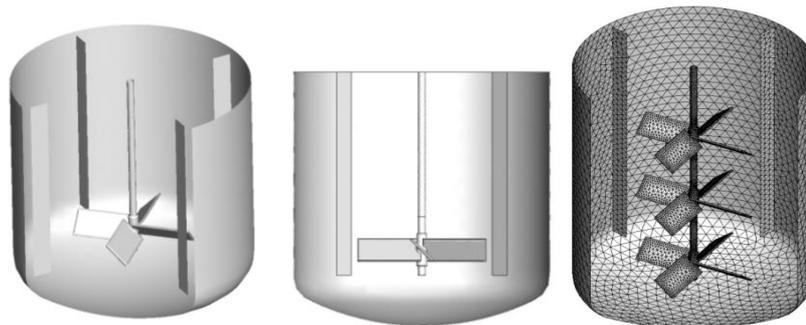


Figura 3. Geometría y mallado del tanque utilizado en las simulaciones.

Las ecuaciones de conservación que se resuelven aquí, se pueden encontrar en las

referencias (p. ej. ANSYS FLUENT User's Guide, 2011) y no se repetirán aquí. Estas

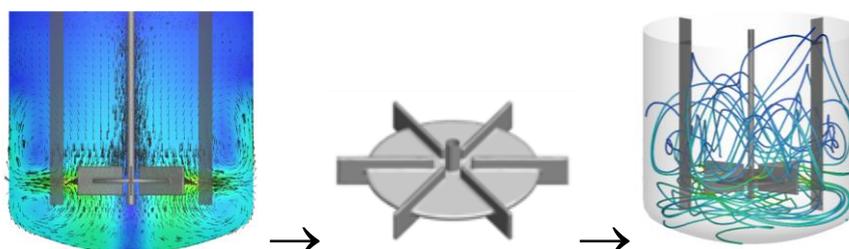
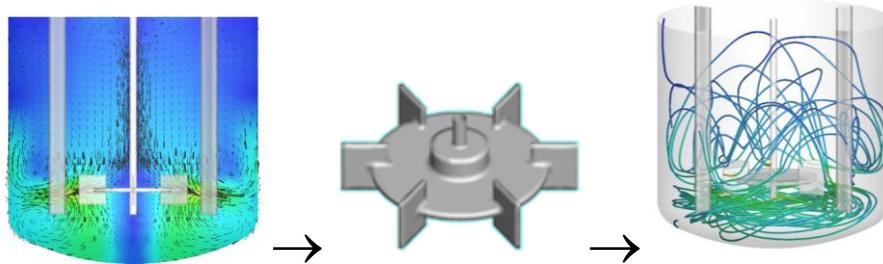


Figura 4. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para un impulsor radial genérico de seis paletas.

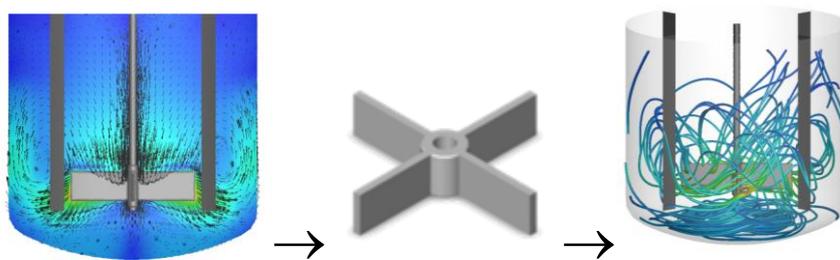


son: la ecuación de continuidad, la ecuación de Navier-Stokes y el modelo de turbulencia  $\kappa - \varepsilon$  realizable. A continuación se presenta el resultado de las simulaciones en un tanque de agitación utilizando diferentes impulsores y combinaciones de estos. Para cada uno de

los casos se muestran los vectores de velocidad, los contornos de velocidad total, la geometría del impulsor y las líneas de trayectoria seguidas por el fluido dentro del tanque.



**Figura 5. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para un impulsor de tipo Turbina de Rushton de seis paletas.**



**Figura 6. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para un impulsor de tipo Turbina de paletas verticales (FBT) de cuatro paletas.**

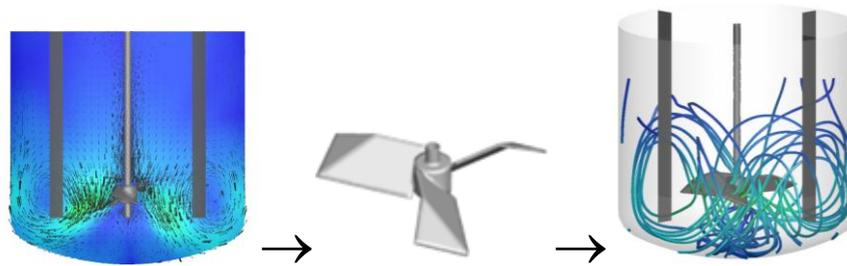


Figura 7. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para un impulsor axial de alta eficiencia de tres aspas.

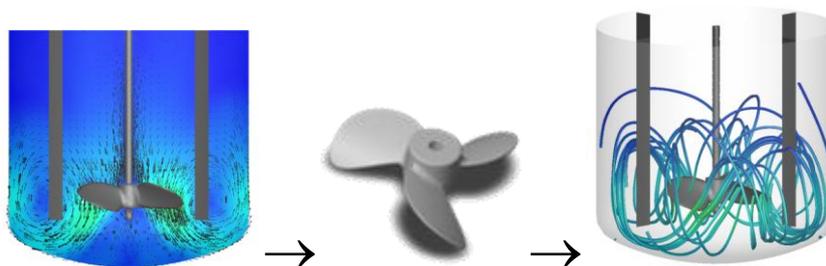


Figura 8. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para una propela de tipo hélice marina de tres aspas.

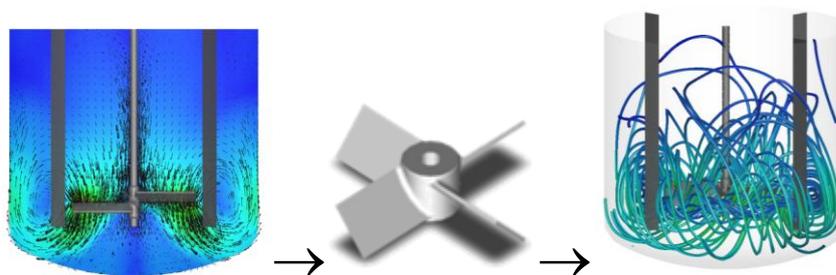


Figura 9. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para un impulsor axial de tipo turbina de paletas inclinadas a 45° de cuatro paletas.



Figura 10. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para un impulsor de flujo cruzado de dos aspas.

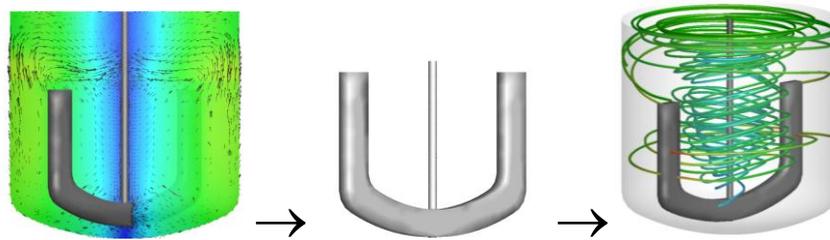


Figura 11. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para un impulsor tipo ancla.

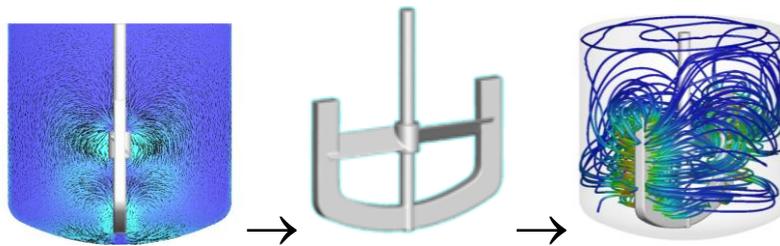


Figura 12. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para un impulsor tipo ancla en combinación con una turbina de dos paletas inclinadas a  $45^\circ$ .

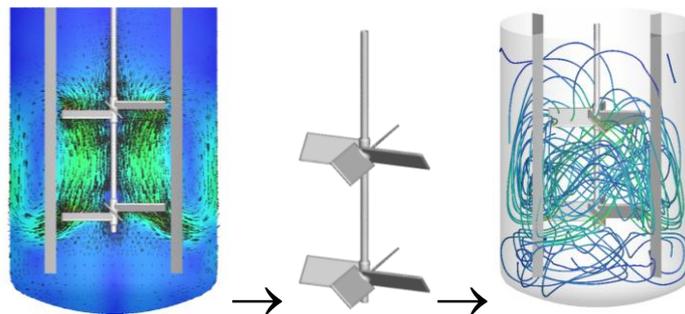


Figura 13. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para una combinación de dos impulsores axiales de tipo turbina de paletas inclinadas a  $45^\circ$  de cuatro paletas.

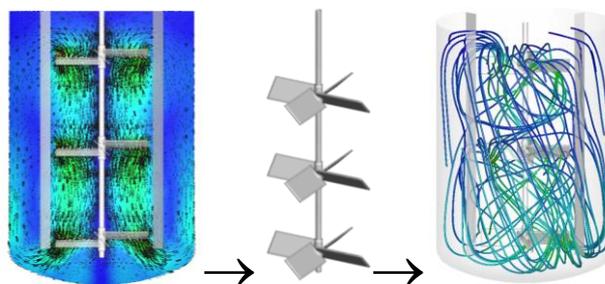


Figura 14. Perfiles y vectores de velocidad, geometría y líneas de trayectoria para una combinación de tres impulsores axiales de tipo turbina de paletas inclinadas a  $45^\circ$  de cuatro paletas.



En las Figs. 4-14 se observan los resultados de la simulación con CFD del comportamiento hidrodinámico de un tanque agitado con el uso de diferentes impulsores. En estas imágenes se pueden observar los vectores y perfiles de velocidad y las líneas de trayectoria para diferentes tipos de impulsores. De acuerdo a las imágenes presentadas, se observa claramente el patrón de agitación para los impulsores de tipo radial y de tipo axial. En el caso de los agitadores de tipo radial, se observa que se forman dos regiones de agitación y hay poco intercambio de fluido entre ellas, por lo que se podría asegurar que este tipo de agitadores no favorece el mezclado, pero, sin embargo, proporciona bastante corte que puede provocar que dos fluidos inmiscibles se dispersen entre sí, por lo que pueden ser adecuados para la dispersión de fases inmiscibles, como un gas en un líquido, y la formación de emulsiones. Por otro lado, en los de tipo axial no se observa la formación de estas regiones, en cambio se observa que las líneas de trayectoria se distribuyen a lo largo de toda la altura del tanque, por lo que el mezclado será más homogéneo que con los del tipo radial, promoviendo así un mezclado más uniforme a lo largo de la altura del tanque. En este último tipo de agitadores, la eficiencia será mayor, ya que se promueve el bombeo sobre el corte.

Los impulsores tipo ancla, Figs 11 y 12, proporcionan poco mezclado, ya que el movimiento observado es casi circular, siendo poco apropiados para mezclar fluidos poco viscosos. Su aplicación estaría más enfocada al mezclado de mezclas muy viscosas. La colocación de un impulsor tipo turbina mejoraría este mezclado en fluidos menos viscosos (Fig. 12)

En las Figs. 13 y 14 se presenta la simulación de la agitación en un tanque más alto que en los anteriores ( $z/T = 1.5$ ), en donde un solo impulsor no proporciona el bombeo adecuado, por lo que es necesario agregar más impulsores para lograr el mezclado requerido. En la Fig. 13 se observa que aún con dos impulsores, el movimiento del fluido se restringe a la zona central del tanque,

quedando las regiones inferior y superior poco agitadas, por lo que al incluir un impulsor adicional, Fig. 14, se logra la agitación requerida y se observa que prácticamente todo el fluido se encuentra bien agitado en la dirección axial.

### Conclusiones:

En este trabajo se presenta la simulación de la agitación y mezclado en un tanque con diferentes tipos de impulsores. Los resultados se presentan solamente de forma cualitativa para observar el patrón de agitación que produce cada diferente tipo de impulsor. Es posible observar claramente la diferencia en la agitación entre los impulsores de tipo radial y de tipo tangencial, así como los de tipo ancla para el mezclado de fluidos muy viscosos. Para el caso en que el tanque agitado sea muy alto es necesaria la colocación de más de un impulsor para lograr el grado de agitación requerida.

### Referencias:

- “ANSYS FLUENT User's Guide. Release 14.0” (2011) ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, U.S.A.
- Bosch Collado, Josep (2006) “Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) a la generación de dades de disseny d'agitadors mecànics a partir de la simulació de ...”, MEMÒRIA, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Química. Spain.
- Dickey, D. S. y Fenic, J. G. (1976) “Dimensional analysis for fluid agitation systems”, Chem Eng., 2, 139-145
- Fořt, Jirout, Sperling, Jambere, and Rieger, (2002) “Study of Pumping Capacity of Pitched Blade Impellers”, Acta Polytechnica, 42 (4), 68-72.
- Giraldo, J.D., Ramírez, V.A., Quintana, G.C. y Alzate H.H. (2011) “Desarrollo de un software para sistemas agitados con fluidos newtonianos”, Investigaciones Aplicadas, 10, 23-31.
- Harnby, N., Edwards, M. F. and Nienow, A. W. (1992) “Mixing in the process industries”, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Hicks, R. W., Morton, J. R. y Fenic, J. G (1976) “How to design agitators for desired process response”, Chem. Eng., 4, 102-109.
- Joshi, J., Nere, N., Rane, C., Murthy, B., Mathpati, C. S., Patwardhan, A. W. and Ranade, (2011) “CFD simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models, Can. J. Chem. Eng., 89, 754-816.
- McCabe, W., Smith, J.C., Harriott, P. (2007) “Operaciones unitarias en Ingeniería Química”, 7ma edición, McGraw-Hill, México.
- Ranganathan, P. y Sivaraman, S. (2011) “Investigations on hydrodynamics and mass transfer in gas-liquid stirred reactor using computational fluid dynamics”, Chem Eng. Sci., 66, 3108-3



REVISTA ENLACE QUÍMICO,  
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO  
VOL 4 NO 1, MAYO DEL 2012  
[No 04-2010-101813383300-102 @](#)