



"CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014"
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

Evaluación de diversos agitadores para el tratamiento de aguas residuales en reactores biológicos aerobios.

Autor responsable: Dr. Antonio Hidalgo Millán*

Coautores Dr. Miguel Ángel Espinosa Rodríguez, Dr. Liborio González Torres y M.C. Rosa María Zambrano Cárdenas.

Correo electrónico: antonio.hidalgo@uan.edu.mx

Universidad Autónoma de Nayarit



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Evaluación de diversos agitadores para el tratamiento de aguas residuales en reactores biológicos aerobios.

Resumen,

El comportamiento de diversos agitadores, una turbina Rushton, turbina PBT, propela, Scaba (CBT) y PBT curvada (CBTD) han sido estudiado en condiciones con inyección de aire y sin airear a diferentes números de Reynolds (10800 a 32400), para la elección del diseño de agitador a utilizar en el reactor biológico construido en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Autónoma de Nayarit. El aire fue introducido al sistema de forma controlado mediante el uso de un aireador a razón de 3 vvm. Consumo de potencia, patrones de flujo y concentración de Oxígeno en el tanque fueron medidos. De estas variables estudiadas, se encontró que los agitadores con paletas curvadas favorecen la dispersión de las burbujas de aire en el reactor, además de encontrar que el agitador con descarga axial presenta un mejor desempeño en las condiciones de estudio. Sin embargo, se encontró que el consumo de potencia era mayor para los impulsores con mayor número de paletas. Estos resultados demuestran que los nuevos diseños de agitadores axiales presentan ventajas sobre los agitadores de descarga radial.

Abstract

Several impellers behavior have been studied under unaerated and aerated conditions (Rushton turbine, Pitched blade turbine PBT, propel, Scaba and Pitched curved blade turbine CBTD) to different Reynolds numbers. In order to choice a design for the wastewater treatment plant to pilot scale in the Autonomous University of Nayarit. The air was introduced in a controlled manner using an aerator at 3 vvm. Power consumption, flow patterns and Oxygen concentration



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

were measurement. Among these variables studied, it was found, the turbines with curved blades showed a better performance under the operation conditions. Nevertheless, the power consumption was higher for the impellers with a greater number of blades. These results evince several advantages of the new impeller designs that the radial discharge impellers.

Palabras Clave

Agitadores, bioreactores, Dispersión gas-líquido, Turbinas, Mezclado.

Introducción

El mezclado es una operación unitaria generalmente utilizada en la industria de proceso. Este tipo de procesos son llevados a cabo de forma común a altos números de Reynolds, debido a que estos sistemas no demandan grandes cantidades de energía y la efectividad del mezclado se puede alcanzar rápidamente (Tatterson 1991, McCabe *et al.*, 2007). Sin embargo, existen situaciones en las que no es posible llevar a cabo estas condiciones de operación, entre las que se encuentran fluidos de alta viscosidad (Alvarez *et al.*, 2002; Ascanio *et al.*, 2002) o en condiciones en las que el daño celular o a microorganismos ocurre como en los bioreactores (Alvarez *et al.*, 2005, Galindo y Nienow, 1992). Esta operación es comúnmente utilizada en condiciones de aireación que permite la supervivencia de microorganismos que favorezcan la reacción y la calidad del producto final. Para este tipo de reactores, la dispersión de burbujas se lleva a cabo con turbinas de descarga axial (Rushton). Sin embargo, en trabajos recientes se han encontrado considerables mejoras utilizando agitadores que presentan descarga axial con una alta relación de solidez (Nienow, y Bujalski 2006). Para determinar los patrones de flujo en el interior del tanque de mezclado se han estudiado diversas técnicas, entre las que destaca la colorimetría la cual estudia la medida de los colores, siendo una técnica



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

no-intrusiva al medio. Los patrones de flujo se determinan al usar algún químico o agregar algún color como indicador en el líquido transparente y seguir la trayectoria del fluido (Vega-Alvarado, *et al.* 2011, Hidalgo-Millán, *et al.* 2012). En general, se han realizados una gran cantidad de estudios para determinar el mejor agitador que se debe utilizar dependiendo de la aplicación a la que será sometido, prevaleciendo una amplia incertidumbre sobre la determinación del agitador más adecuado para los reactores biológicos aerobios. El principal objetivo de este estudio, es diseñar y/o elegir un agitador basándonos en su desempeño a escala laboratorio para utilizarlo en un tanque de tratamiento de aguas a nivel planta piloto de la Universidad Autónoma de Nayarit.

II. Metodología

Todos los experimentos se realizaron a escala laboratorio en un tanque cilíndrico de acrílico con fondo plano, con un diámetro de $T = 0.48$ m, con dos diferentes niveles de líquido de $H = T/3$ y $H = 2T/3$, con un solo agitador sin deflectores y la posición del impulsor con respecto al fondo del tanque $C = T/6$. Como fluido de trabajo se utilizó agua del grifo ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Un motor industrial de C.D. de $\frac{1}{4}$ HP (BALDOR) se utilizó para proporcionar la potencia necesaria que habilitó el eje de los impulsores estudiados en este trabajo, las velocidades de rotación de todos los impulsores en todas las pruebas realizadas se realizaron entre 20-60 rpm con incrementos de 10 rpm y un error de ± 0.5 rpm. La velocidad se mantuvo constante mediante el uso de un controlador de velocidad conectado al motor, censando la velocidad mediante el uso de un tacómetro digital. Con el fin de evitar cambios significativos en el índice de refracción y reducir la distorsión óptica generada por la curvatura del tanque, se empleó una camisa cuadrada que contiene el mismo fluido sujeto a estudio. Todos los experimentos se realizaron colocando el eje del impulsor en el centro del tanque. Cinco diferentes impulsores de acero inoxidable fueron estudiados, todos con un diámetro $D = 0.18$ m, Una turbina de palas inclinadas, PBT (pitched blade



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

turbine), con un ángulo en la inclinación de sus palas de 45° , una turbina Rushton, un agitador scaba SRGT, una propela y una turbina de paletas curvadas inclinadas 45° . Para medir el consumo de potencia de los diferentes agitadores se utilizó un torquímetro (FUTEK modelo TRS300) adaptado al eje del impulsor y conectado en lazo cerrado a una computadora, para capturar los datos arrojados por el software (SENSIT Test and Measurement) de FUTEK. Se tomaron 1000 mediciones durante un periodo de 5 minutos y se obtuvieron un promedio de todas ellas (se realizaron 3 veces). La visualización de los patrones de flujo en condiciones sin aireación se realizó utilizando el método de colorimetría, técnica no intrusiva que consiste en llevar a cabo una reacción ácido-base en presencia de un indicador, generando cambios de color en la solución estudiada, la base utilizada fue NaOH 1M y el ácido HCl 1M. Para las pruebas con aireación, se utilizó un aireador diseñado especialmente para producir tamaños de burbujas de 2.0 mm de diámetro aproximadamente para ser perturbadas por la hidrodinámica que generaba el movimiento del agitador (actualmente el aireador está en proceso de realizar un estudio a profundidad para obtener más información del sistema). El estudio de la trayectoria de las burbujas para los diferentes agitadores se realizó mediante la toma de video con una cámara digital.

III. Resultados

Consumo de potencia

El consumo de potencia de los agitadores se presenta en la figura 1. En esta, se representa la variación de los números adimensionales Po contra el Re , observando que su valor se incrementa a medida que se incrementa la velocidad de rotación del impulsor. Además se observa que los valores de potencia mayores se producen con los impulsores que presentan mayor número de paletas. Estos impulsores tienen 6 paletas, con una mayor área de contacto entre el líquido y el agitador, lo que se traduce en un mayor consumo de potencia debido a los altos



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

valores en el coeficiente de arrastre hidrodinámico que deben causar los agitadores para generar una mejor homogeneidad. Estos resultados son semejantes a los reportados por Kumaresan y Joshi (2006), quienes encontraron que para turbinas PBT con relación W/D constante, pero variando el número de palas de 4 a 6 el número de potencia incrementa. En condiciones de aireación el consumo de potencia disminuye para los diferentes agitadores en un rango de 5 % hasta el 10 %, al compararse con un sistema sin aireación. Sin embargo, estos resultados no necesariamente sugieren que los agitadores puedan manejar grandes cantidades de gas. Bakker y Van den Akker 1994, concluyen que agitadores con una grande relación de solidez son capaces de manejar mayores cargas de gas, en nuestro caso los agitadores con seis paletas, son los que presentan estas mayores relaciones.

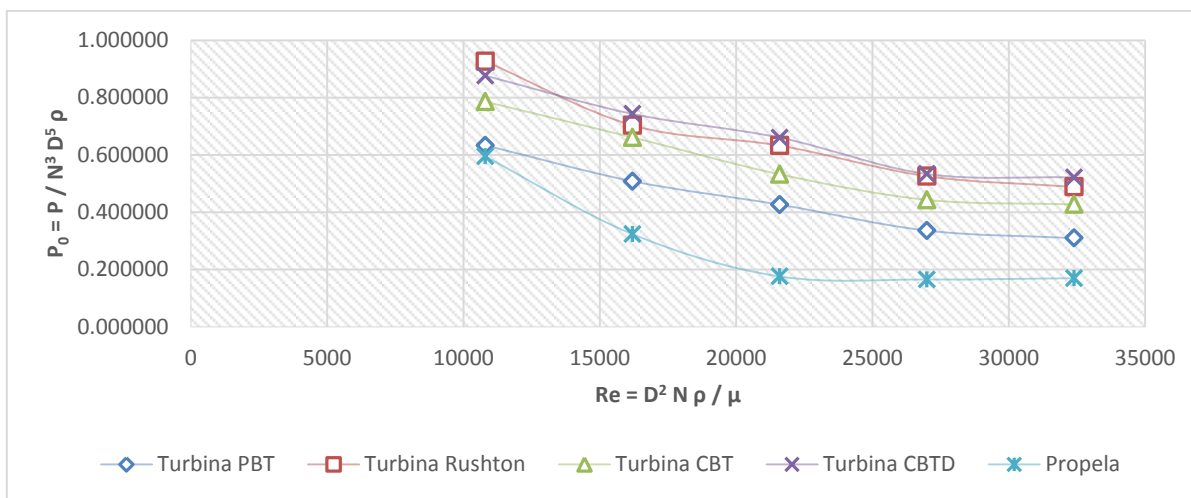


Figura 1. Consumo de potencia a $H=2T/3$

Concentración de Oxígeno

La concentración de oxígeno en el sistema de agitación con dos fases arroja los resultados que se muestran en la figura 2, para una velocidad de agitación de 50 rpm con los agitadores que presentan una mayor relación de solidez, debido a que son capaces de manejar mayores cargas de aire. La turbina PBT y la CBTD son



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

las turbinas con una mayor concentración de Oxígeno, aunque estos valores se incrementan a mayores velocidades de agitación, manteniendo en todos los casos tendencias similares. Se ha estudiado que para sistemas de agitación con una fase líquida con dispersión de burbujas en tanques agitados las turbinas con paletas curvas, presentan las mejores condiciones de operación (Zhu, H. *et. al*, 2009) debido a que evitan el efecto de la cavitación (fenómeno que provoca la reducción de la vida útil del agitador al ser desgastado por el golpeteo de la burbuja de aire sobre la superficie posterior al sentido de giro del impulsor).

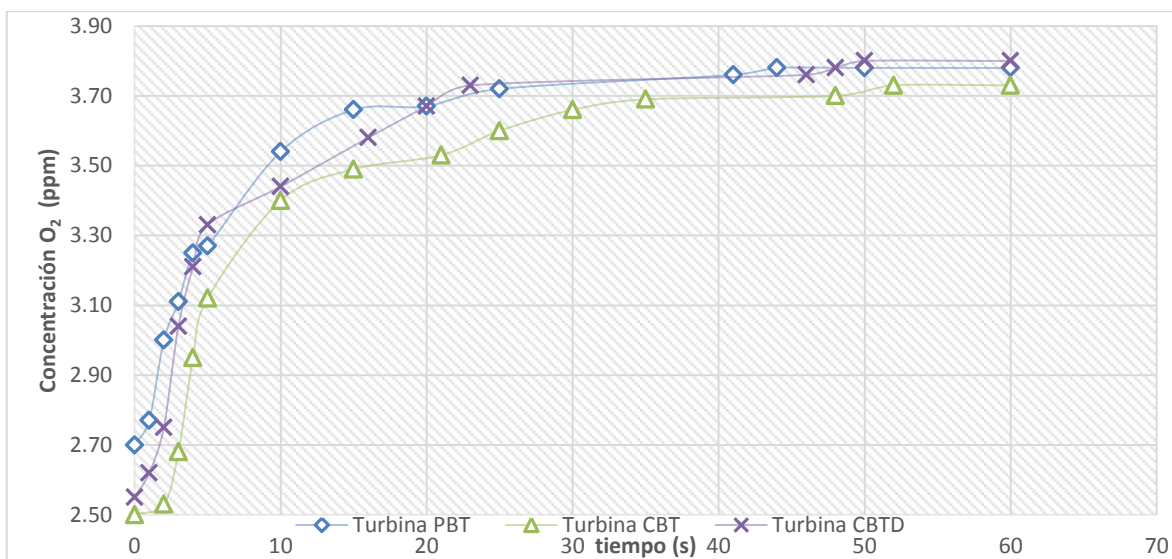


Figura 2. Gas retenido en función del tiempo a $H=2T/3$

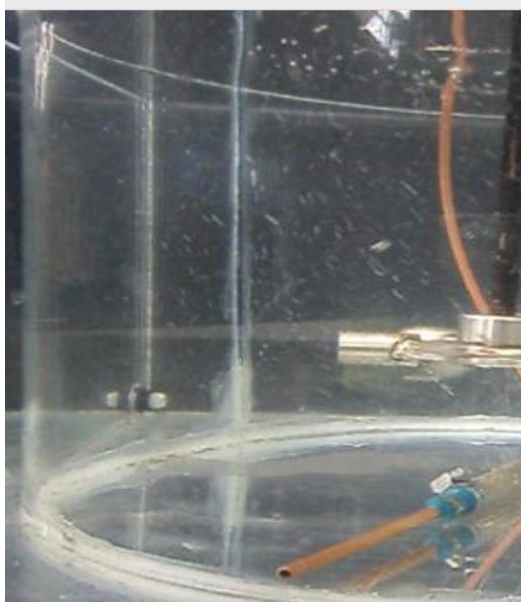
En la figura 3, se observa el desempeño de la turbina CBT y la turbina CBTD, la primera con flujo de descarga radial y la segunda con flujo de descarga axial, las cuales presentaron las mejores condiciones de dispersión de burbujas. De estas imágenes se observa que la correspondiente al agitador CBTD produce una mayor distancia de burbujas provocada por el agitador, alcanzando las paredes del reactor e incluso dispersando el aire en dirección al fondo del tanque.

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

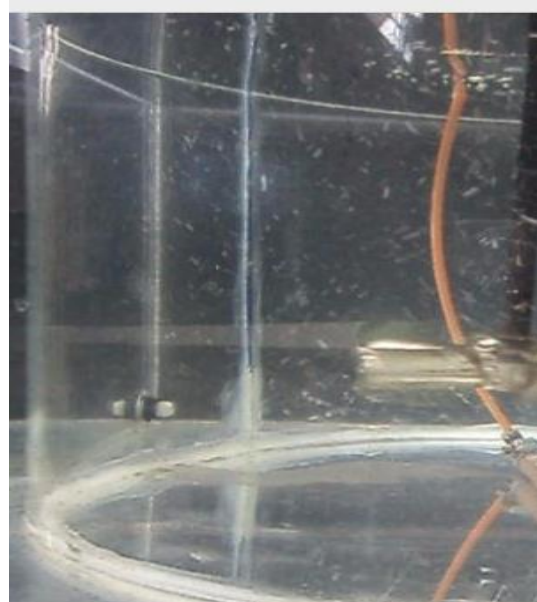
Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635



a)



b)

Figura 3. Dispersión de las burbujas en el tanque agitado para a) turbina CBT y b) turbina CBTD

En ambos casos no se observan acumulación de burbujas en la parte posterior del agitador, estas observaciones son similares a las encontradas por otros trabajos publicados para turbinas de paletas curvas, McFarlane *et al*, 2004, Aubin, *et. al*, 2004

Patrones de flujo

En las figuras 4 se observan los patrones de flujo generados por la turbina PBT a ($H=2T/3$), esta turbina presenta descarga axial, en estas series de figuras se observa que independientemente del nivel H y del número de Reynolds, los patrones de flujo de un agitador en cuestión dependen en gran medida de su geometría. A $H=T/3$ la turbina PBT mezcla más rápidamente por encima del impulsor, mientras que a $H=2T/4$ el mezclado es más rápido por debajo del impulsor.

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

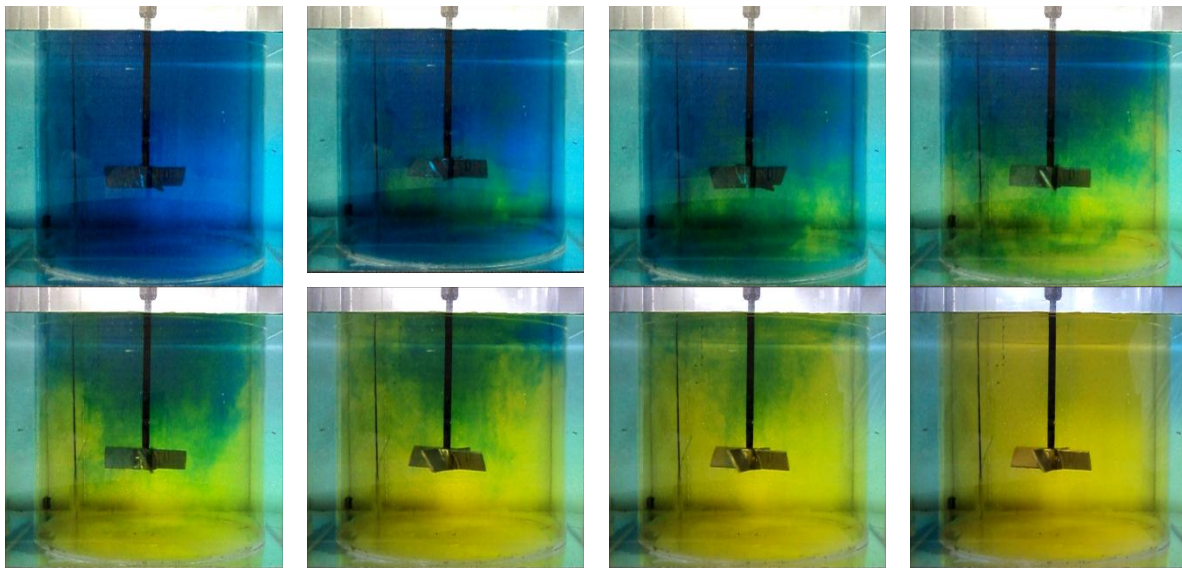


Figura 4. Patrones de flujo generados por la turbina PBT a $2H/T$

La turbina Rushton presenta patrones de flujo radial en donde se observa la presencia de un vórtice por debajo del impulsor y otro por encima del impulsor ($H=2T/3$), tanto el vórtice generado por debajo del impulsor como el que aparece por encima del mismo, son generados a $Re \geq 27000$ en líquidos de muy baja viscosidad. Ambos vórtices influyen negativamente en el tiempo de mezclado.

Para la turbina Escaba SRGT, presenta patrones de flujo similares a los de la turbina Rushton. Ambos impulsores, a $H=2T/3$ homogenizan más rápido en el fondo del recipiente, mientras que a $H=T/3$, la turbina Rushton mezcla más rápido en la superficie del líquido, en contraste con la turbina Escaba SRGT, la cual mezcla más rápido por debajo de su plano. El flujo radial de la turbina Escaba SRGT al igual que la turbina Rushton genera vórtices tanto por debajo como por encima de su plano, esto puede observarse a $Re \geq 27000$. Los patrones de flujo producidos por el impulsor CBTD, al igual que la PBT presenta patrones de flujo axial, los cuales son consecuencia de la inclinación de las palas del impulsor. A $H=T/3$ se puede ver que la turbina PBT mezcla más rápido en la superficie del líquido, mientras el impulsor CBTD lo hace en el fondo del recipiente. A $H=2T/3$ tanto la turbina PBT como el CBTD mezclan el líquido rápidamente por debajo de



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

su plano. Para la propela, se observa un patrón de flujo axial completamente desarrollado. El patrón generado hacia el fondo del tanque denota la presencia de un vórtice que succiona al fluido hacia él, evitando que pueda salir de su región altamente turbulenta, este fenómeno influyó en gran medida con el tiempo de mezclado de la propela.

IV. Conclusiones

En el presente trabajo se comparó la hidrodinámica de diferentes agitadores: el tiempo de mezclado, el consumo de potencia, los patrones de flujo y su capacidad para dispersar burbujas en un líquido a dos niveles diferentes del líquido ($H=T/3$, $2T/3$) y dentro del rango de $Re=10800-32400$. De acuerdo a este estudio se encontró lo siguiente:

- A altos número de Reynolds (32400), el consumo de potencia a $H=2T/3$ es entre 1.4-1.6 veces el consumo de potencia a $H=T/3$. Mientras a bajos números de Reynolds e consumo de potencia de $H=T/3$ a $H=2T/3$ aumenta aproximadamente 2 veces.
- El número de potencia P_0 , aumenta al incrementar el número de palas del impulsor y el área de contacto entre las palas y el fluido
- Al incrementar la velocidad de rotación del agitador, la capacidad del impulsor para la dispersión gas-líquido se incrementa.
- Las turbinas de disco presentan coalescencia de burbujas bajo su disco. Por otro lado la turbina CBTD presenta la mayor dispersión de burbujas teniendo la ventaja de que las turbinas con descarga axial son recomendadas para la suspensión de sólidos como en el caso del floculo que aparecen en el tratamiento de aguas residuales.

En base a los resultados obtenidos en el presente estudio, se tiene finalmente el diseño del agitador que deberá emplearse en el tanque aerobio para tratamiento



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

de aguas residuales. Actualmente se encuentra en fase de evaluación y prueba para su incorporación al tanque a escala de la planta piloto.

V. Bibliografía.

Alvarez, M., Arratia, P.E. and Muzzio, F.J., 2002, “Laminar Mixing in Eccentric Stirred Tank Systems”, Can. J. Chem. Eng., 80, 546-557.

Alvarez, M., Guzmán, A. and Elías, M. 2005, “Experimental visualization of mixing pathologies in laminar stirred tank bioreactors”, Chem. Eng. Sci., 60, 2449-2457.

Ascanio, G., Brito-Bazan, M., Brito-De La Fuente, E., Carreau, P.J. and Tanguy, P.A., 2002, “Unconventional Configuration Studies to Improve Mixing Times in Stirred Tanks”, Can. J. Chem. Eng., 80, 558-565

Aubin, J., Sauze, N.L., Bertrand, J., Fletcher, D.F. y Xuereb, C., 2004, “PIV measurement of flow in an aerated tank stirred by a down- and an up-pumping axial flow impeller. Exp. Therm. Fluid. Sci, Vol. 28, pages 447-456.

Bakker, A., Van den Akker H.E.A., 1994. “Gas-Liquid Contacting with axial Flow Impellers”. Chemical Engineering Research and Design, TranslChemE Vol. 72, Number A4, July, 1994, pages 573-582.

Galindo, E. y Nienow, A.W., 1992 “Mixing of Highly Viscous Simulated Xanthan Fermentation Broths with the lightning A-315 Impeller”. Biotechnol. Prog. Vol. 8, page 233.

Hidalgo-Millán, A., Taboada, B., Vega-Alvarado, L., Zenit, R. and Ascanio, G., (2012) Enhancement of Laminar Mixing in Stirred Vessel using Geometrical Perturbations, JART. V. 10, No. 4, 520-534

Kumaresan, T. y Joshi, J.B., 2006. “Effect of Impeller Design on the Flow Pattern and Mixing in Stirred Tanks”, Chem. Eng. J., V. 115, pages 173-193.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

McCabe, W.L., Smith, J.C. y Harriot, P., “Operaciones unitarias en ingeniería química”, 7ª Ed. McGrawHill, México 2007

McFarlane, C.M., Zhao, X.M. y Nienow, A.W., 1995 “Studies of high solidity ratio hydrofoil impellers for aerated bioreactors. 2”. Air water studies. Biotechnol Prog, Vol. 11, pages 608-618.

Nienow, A.W. y Bujalski, W., 2004. “The versatility of up-pumping hydrofoil agitators”. Trans IChemE, Part A, Chem. Eng. Res. Des., Vol. 82, pages 1073-1081.

Tatterson, G.B., “Scaleup and Design of Industrial Mixing Processes”. McGraw-Hill, New York, 1994.

Vega-Alvarado, L. Taboada, B., Hidalgo-Millán, A. and Ascanio, G., 2011, An Image Analysis Method for Measuring Mixing Times in Stirred Vessels, Chem. Eng. Technol. 34, No. 6, 859–866. Chem. Eng. Technol. 2011, 34, No. 6, 859–866.

Zhu, H., Nienow, A.W., Bujalski, W. y Simmons, M.J.H., 2009. “Mixing studies in a model aerated bioreactor equipped with an up- or a down-pumping ‘Elephant Ear’ agitator: Power, hold-up and aerated flow field measurements”, Chemical Engineering Research and Design, TransIChemE Vol. 87, pages 307-317.