

## Comparación numérica de agitación por medio de agitador tipo Rushton sencillo y doble mediante CFD con el método SPH

Numerical comparison of stirring by means of a single and double Rushton type stirrer using CFD with the SPH method

Carlos Enrique Alvarado Rodríguez<sup>1</sup>, José de Jesús Ramírez Minguela<sup>1</sup>, Diego Ian Agabo Aguilar<sup>2</sup>, Nataly Andrea Nava Robledo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Profesor-Investigador en la Universidad de Guanajuato y corresponsable del Proyecto en el XXIX Verano de Investigación. Campus Guanajuato. División de Ciencias Naturales y Exactas. Departamento de Ingeniería Química.  
[ce.alvarado@ugto.mx](mailto:ce.alvarado@ugto.mx)<sup>1</sup>

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Química y participante del XXIX Verano de Investigación. Universidad de Guanajuato. Campus Guanajuato. División de Ciencias Naturales y Exactas. Ingeniería Química.<sup>2</sup>

### Resumen

En este trabajo se presenta un análisis del proceso de mezclado de Agua-Etanol al 50% mediante simulación numérica usando técnicas CFD con el método SPH. Se simuló la agitación de un tanque de medio litro con agitadores Rushton, sencillo y doble, mediante el software libre DualSPHysics. A partir de los resultados numéricos se obtuvieron los campos de velocidad, vorticidad, densidad, gradientes y la curva de porcentaje de mezclado para 2 minutos de agitación. El agitador doble Rushton genera dos vórtices alrededor de cada agitador lo cual incrementa el porcentaje de mezclado para un tiempo de 2 segundos alcanzando un 2.5 de porcentaje de mezclado en comparación con el Rushton sencillo que alcanza el 1.5% de mezclado en el mismo tiempo de agitación.

**Palabras clave:** CFD; Tanques agitados; Simulación; Tiempo de mezclado, SPH.

### Introducción

Actualmente, en muchas industrias, se usan tanques agitados para formar productos deseados para su distribución y comercio. Pero como en toda industria, los tanques utilizados presentan una gran área para mejorar y así efficientizar los procesos, y los recursos y tiempos que estos necesitan.

El análisis para la correcta selección de un agitador adecuado puede reducir en práctica los tiempos de mezclado necesarios que actualmente se requieren con los equipos con los que las empresas trabajan hoy en día. Las partes que conforman un agitador influyen en mayor parte a la eficacia de este, como el tamaño, peso o forma.

El buen mezclado en los diferentes procesos en los que se requiera un agitador dependerá del diseño apropiado de este (Uribe, et al. 2012). Es muy importante para las industrias contar con agitadores eficientes, pues el trabajo realizado, ya sea agitar, mezclar y homogenizar materiales o materias primas, o acelerar la transferencia de masa y calor, hace un gasto costoso en el consumo energético (Rodríguez, et al., 2018). Si no se cuenta con un agitador ideal para el proceso no permitirá, aumentar la producción, mejorar la calidad del producto y reducir las mermas, ya que no estará diseñado para maximizar la transferencia de energía del fluido (Chambergro, et al., 2017). Los agitadores industriales deben de ser diseñados especialmente para las necesidades específicas de cada proceso, es decir que, mediante estudios previos de la reología del fluido con análisis computacional se debe asegurar de cumplir con los estándares de calidad y seguridad, ofreciendo con ello la productividad como la rentabilidad del proceso a fin, teniendo ahorros significativos y una disminución de desperdicio a un largo plazo (Gil et al., 2016).

Hay diversos tipos de agitadores, que por sus formas presentan más eficiencia unos respecto que otros, como los de la Figura 1.

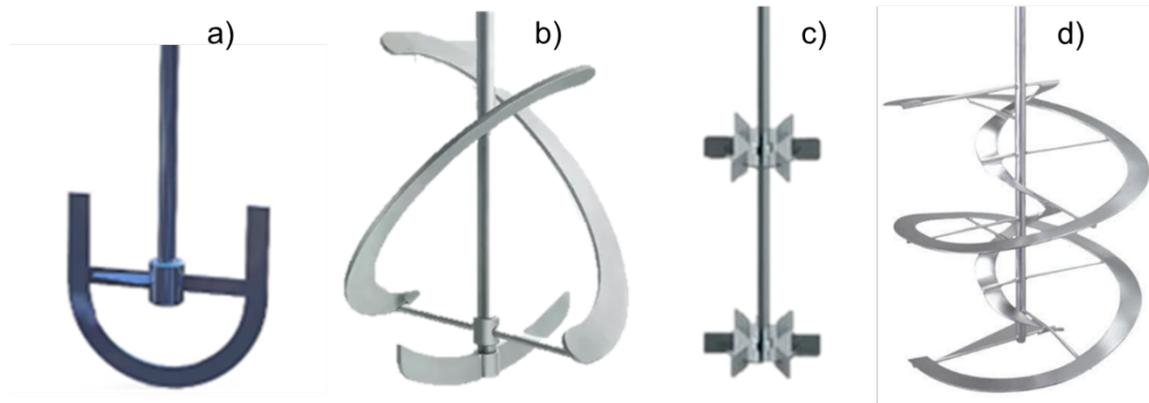


Figura 1. Tipos de agitadores utilizados en la industria.

Por sus diversas y tan variadas formas y tamaños, suelen usarse para diferentes trabajos, un ejemplo claro está en el agitador de la Figura 1a, usado con líquidos viscosos y pesados, por eso va a baja velocidad y se usa en tanques de diámetro pequeño, lo que permite arrastrar partículas sedimentadas, en cambio, el agitador de la Figura 1c tiene altas velocidades para conseguir un mejor mezclado.

Para este trabajo se evaluó el desempeño de un agitador tipo Rushton, se usaron métodos de CFD con DualSPHysics, un software que utiliza el método lagrangiano de Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (SPH por sus siglas en inglés) para el análisis de partículas que forman los sólidos y fluidos que se analizan en la simulación.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) tiene como objetivo el replicar el comportamiento que tendrían los fluidos, pero de forma computacional con métodos numéricos, esto para simular una situación que pudiese presentar problemas al realizarlas de forma experimental.

Con el método SPH, a diferencia del método Euleriano que es utilizado en otros softwares, al no utilizar un dominio creado con mallas, se pueden crear formas no continuas, permitiéndonos simular un entorno más realista.

## Metodología

Las simulaciones numéricas se realizaron utilizando el software DualSPHysics (Domínguez et al., 2022) el cual está basado en el método SPH, con ayuda del software de modelado en 3D "SolidWorks" se diseñaron dos agitadores tipo Rushton y un tanque con las dimensiones mostradas en la Figuras 2.

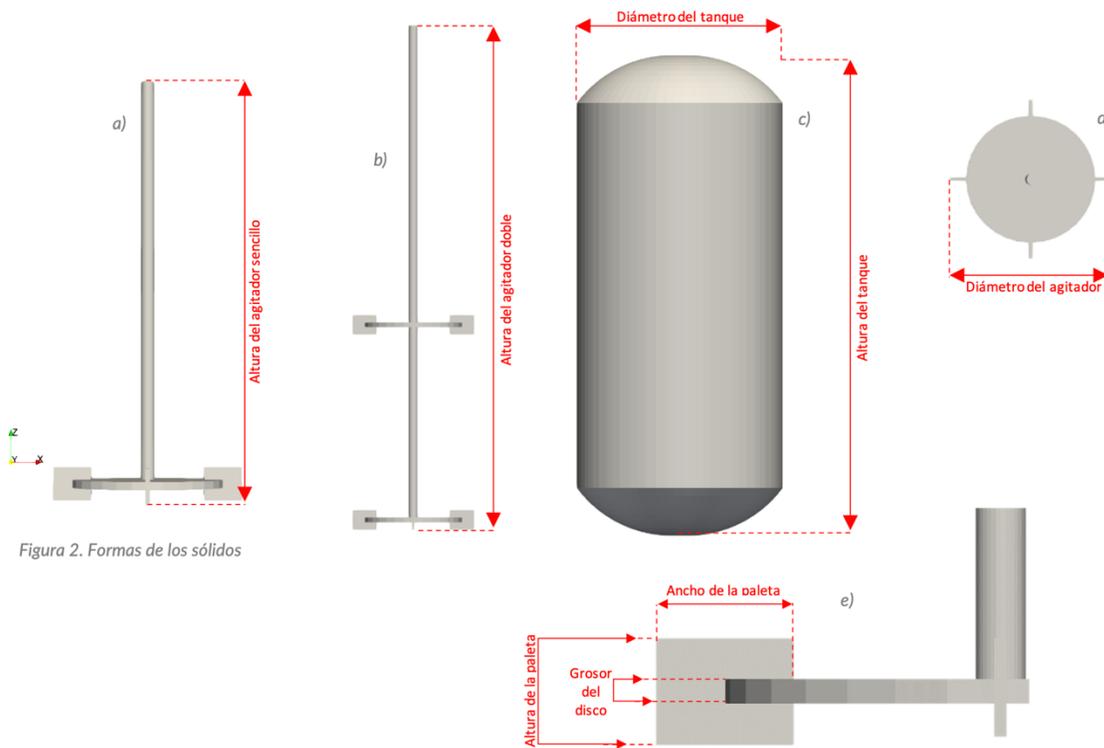


Figura 2. Formas de los sólidos

Figura 2. Formas de los sólidos

Las geometrías del tanque y agitadores generadas en CAD fueron importadas en el software DualSPHysics para generar las condiciones de contorno fijas y móviles en la simulación. Se diseñaron dos agitadores y un tanque, el agitador de la Figura 2a tiene solo un disco con cuatro paletas para mover el fluido una vez rotando, este ubicado a la mitad de las dos sustancias, en cambio, el agitador de la Figura 2b tiene dos discos distribuidos de manera que cada uno se ubica al centro de uno de los componentes de la mezcla.

Ambos agitadores comparten el mismo diámetro contando la distancia que sobresale desde el extremo de una pala hasta el extremo de la pala del lado opuesto como se indica en la Figura 2c. Las dimensiones de todos los sólidos, así como las propias de los discos y las paletas se encuentran reportadas en la Tabla 1.

El agitador sencillo se colocó a 0.044 m del fondo del tanque, esto con la intención de ubicarlo en la división que creaban los espacios que ocupaban los líquidos (Figura 3). En cambio, el agitador doble se colocó a 0.0189 m del fondo del tanque, y el espacio que separa ambos discos es de 0.046 m, así se logró ubicar los discos en el centro de cada sustancia (Figura 3).

El tanque se llenó al 70% de volumen, siendo 35% agua en el fondo y 35% etanol en la parte superior del líquido. Se consideró un proceso de mezclado isotérmico a 25°C. La distancia inicial entre partículas es de 1 mm generando un total de 270232 partículas fluidas y 187512 partículas contorno (tanque más agitador). La velocidad inicial de los líquidos es cero y se establece una condición de contorno de no deslizamiento en la superficie del tanque. La velocidad de agitación para los dos agitadores es de 203.4 grados/s estableciendo un número de Reynolds de 10000. La velocidad inicial del agitador es cero y se acelera a 203.4 grados/s durante 1 segundo hasta alcanzar la velocidad de agitación constante.

Se simularon 2 minutos de tiempo de mezclado y se evaluó el porcentaje de mezclado a lo largo del tiempo de simulación, así como la velocidad promedio durante los últimos 30 segundos de la simulación. Los parámetros de los fluidos utilizados en la simulación se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 1.** Dimensiones de los sólidos

Medida	Longitud (m)
Altura del agitador sencillo	0.07558
Altura del agitador doble	0.12304
Diámetro del agitador	0.03437
Altura del tanque	0.15984
Diámetro del tanque	0.07228
Ancho de la paleta	0.00690
Altura de la paleta	0.00550
Grosor del disco	0.00125



Figura 3. Condición inicial de la simulación. A la izquierda el caso de Rushton sencillo y a la derecha el caso de Rushton doble.

**Tabla 2.** Propiedades termodinámicas de las sustancias

Propiedad	Agua (Fase inferior)	Etanol (Fase superior)	Mezcla Agua-Etanol
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1000	789	914
Viscosidad (Pa*s)	0.001	0.0012	0.0023
Coefficiente de Difusión (m <sup>2</sup> /s)			1.24x10 <sup>-9</sup>

## Resultados

Se obtuvieron dos simulaciones de tanques con agitadores tipo Rushton, uno doble y uno sencillo, esto con el objetivo de hacer una comparación del proceso de agitación de cada uno de ellos. A partir de los resultados numéricos es posible observar, a través de parámetros, la operatividad de dichos agitadores, para comprobar cuál de los agitadores es más eficiente a continuación se presentará una comparación en cada uno de los parámetros evaluados.

En la Figura 4 se puede ver una comparación de la evolución de la densidad (kg/m<sup>3</sup>) en la agitación de agua-etanol agitados con los agitadores tipo Rushton a) Sencillo y b) Doble, donde el etanol se encuentra en la

capa superior y el agua en la capa inferior del tanque, se tomó la imagen en diferentes tiempos de simulación comenzando en el tiempo 0 s, después en 12 s, posteriormente en 36 s y terminando en 60 s. Observando el agitador sencillo logramos notar como la principal permuta en la densidad sucede en la cercanía del disco especialmente en las paletas de este llegando a generar vórtices en la parte inferior del tanque en el segundo 60; mientras que del agitador doble podemos recalcar que el cambio primordial de densidad ocurre en medio de los dos agitadores en la frontera de las dos sustancias presentes, acorde avanza el tiempo se generan remolinos tanto en la parte superior del tanque como en la inferior dándonos indicios de una mezcla en menor tiempo.

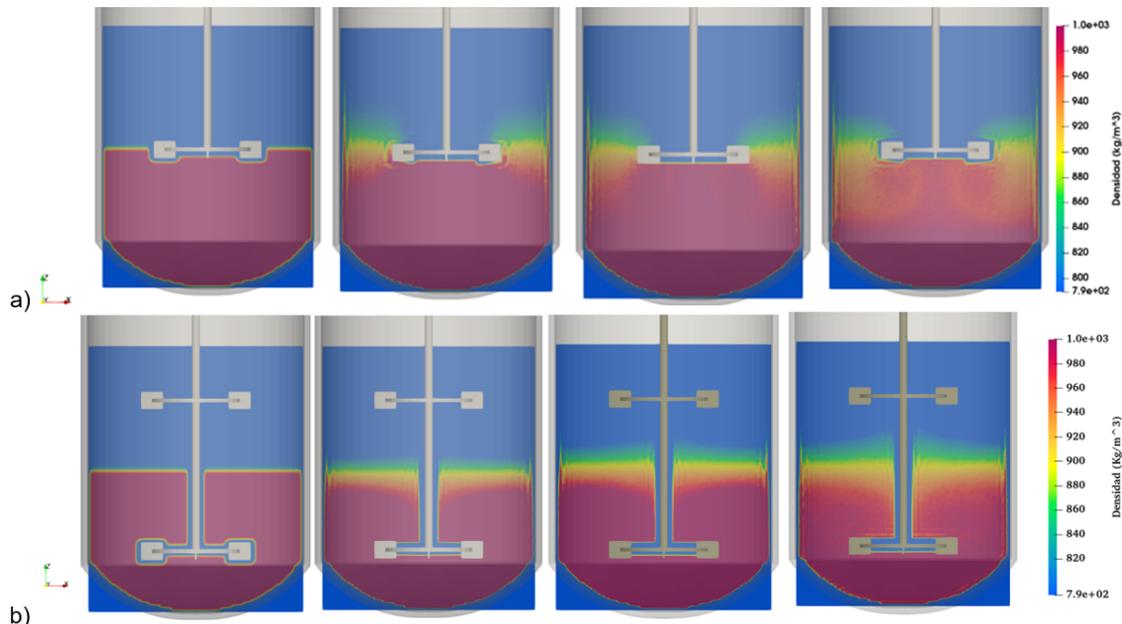


Figura 4. Cambio en la densidad en el interior del tanque para ambos casos de simulación. a) Rushton sencillo, b) Rushton doble.

La Figura 5 muestra una comparación entre el agitador tipo Rushton sencillo y doble de la divergencia en todos los puntos simulados, en base a esto se observa en el agitador tipo Rushton a) Sencillo que la principal tasa de cambio en la densidad en el espacio del tanque se da en el contorno próximo del disco, mayormente donde se encuentran las paletas del agitador tipo Rushton, eso se puede apreciar por el evidente tono azul que contrasta con el amarillo el cual indica que no hay cambios en el resto del tanque. Así mismo analizando el agitador tipo Rushton doble nos podemos dar cuenta que la densidad varía en torno a los dos discos y sus paletas presentes, así como en otras zonas del tanque, es decir, hay más tasa de cambio en la densidad teniendo un agitador doble. Cabe mencionar que una divergencia positiva indica una expansión del fluido en ese punto, mientras que una divergencia negativa indica una contracción.

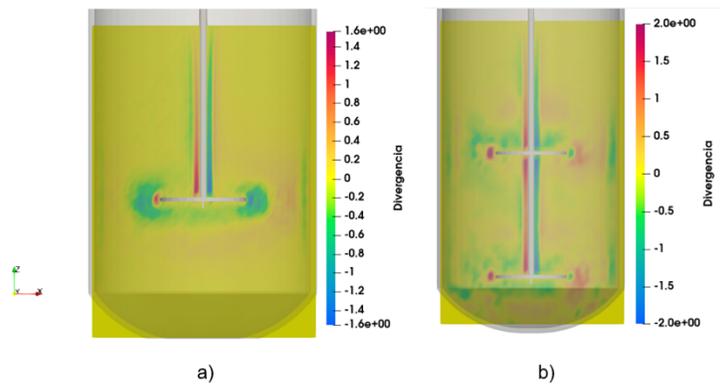


Figura 5. Divergencia de la velocidad en el interior del tanque obtenida mediante simulación numérica.

El gradiente de velocidad nos habla de cómo el fluido cambia respecto al movimiento que se produce dentro del tanque, por tanto, es sostenible observar en la Figura 6 para el primer agitador tipo Rushton a) Sencillo la zona con un mayor gradiente sea la más cercana al disco y paletas en este caso se puede ver que estas zonas de principal actividad se encuentran en el rango de 16 a 30 aproximadamente, mientras que la zona azul nos indica un nulo cambio en el perfil de velocidad del fluido. Igualmente, el agitador tipo Rushton b) Doble que consta de dos discos con paletas presenta su más grande transformación de la velocidad alrededor de dichos agitadores y en las regiones próximas de estos, habiendo una mayor representación de color verde en ese tanque. Cabe recalcar que el rango en la escala del inciso b) es más alta que en el inciso a), lo cual es un evidente indicador que hay una presencia prominente de velocidad en el agitador b).

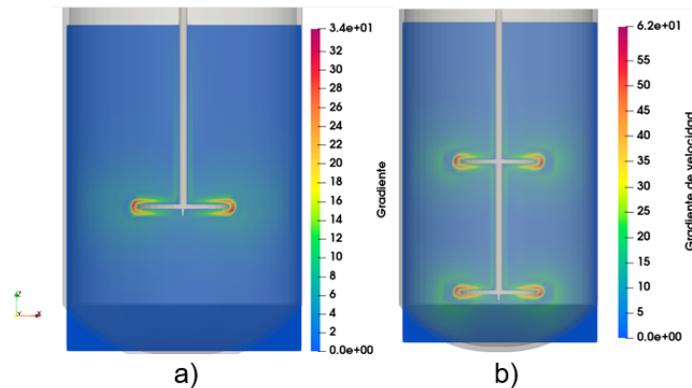


Figura 6. Gradiente de velocidad promedio en el tanque agitado. a) Sencillo, b) doble

La Figura 7 nos habla sobre el cambio de gradiente de densidad en los siguientes tiempos simulados: 0 s, 12 s, 24 s, 36 s, 48 s y 60 s. Este gradiente representa el mayor cambio en la mezcla en cada uno de los puntos mencionados, haciendo una comparación de cada agitador logramos observar en el tanque sencillo que la principal variación de densidad en la mezcla sucede en la interfase del etanol y el agua aledaño al agitador tipo Rushton esto se deduce por la presencia de los colores rojo y amarillo, también podemos notar la coloración verde y amarilla en otras regiones del sistema, conforme avanza el tiempo parece que la mezcla se inclina a homogeneizar incluso se llegan a visualizar remolinos bajo el impulsor indicando turbulencia en la mezcla. Las zonas rojas en la parte superior del tanque son interacciones con el entorno en este caso aire que para el objetivo de nuestro análisis no son relevantes. Enfocando nuestro análisis al tanque doble logramos percatarnos de que existe una permuta alta en la zona media del tanque, igual que en el caso a), en el segundo 60 percatamos cómo es una mezcla uniforme en una extensa área del medio. Comparando ambas imágenes se podría deducir que ambas se orientan a una mezcla homogénea, pero el caso puede que el caso b) llegue a ese punto en menor tiempo.

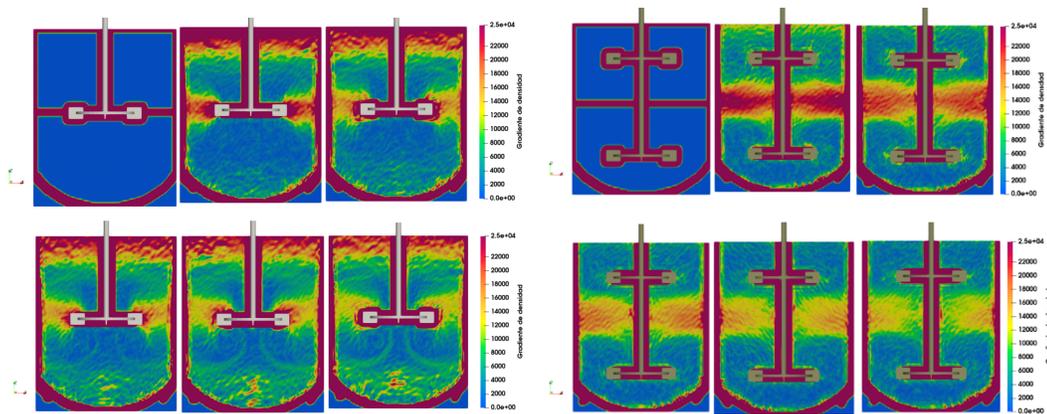


Figura 7. Gradiente de densidad en el tanque agitado.

En la Figura 8 Se muestran los campos de velocidad y la dirección de la vorticidad, mediante vectores, en el interior del tanque. Examinando el agitador tipo Rushton a) Sencillo evidentemente el cambio más considerable de velocidad en el fluido se registra en la proximidad del disco con paletas pues es donde ocurre todo el movimiento de las sustancias, tomando valores alrededor de 0.03 m/s hasta 0.05 m/s. Las flechas negras en la imagen de la derecha indican vectores del movimiento que se da en el fluido, se generan vórtices en cada lado del agitador lo que es coherente de acuerdo con la agitación que está aconteciendo. Haciendo el análisis para el inciso b) podemos deducir que al coexistir dos discos con paletas la velocidad promedio que se observa en torno al agitador a) es muy semejante, sin embargo, esta velocidad promedio se ve duplicada en el tanque del inciso b) en la región inferior y superior del mismo por ello se entiende que existe una velocidad promedio superior en todo el sistema; de igual manera los vórtices producidos por los vectores se contemplan en el agitador superior e inferior existiendo abundante circulación del fluido dentro del tanque.

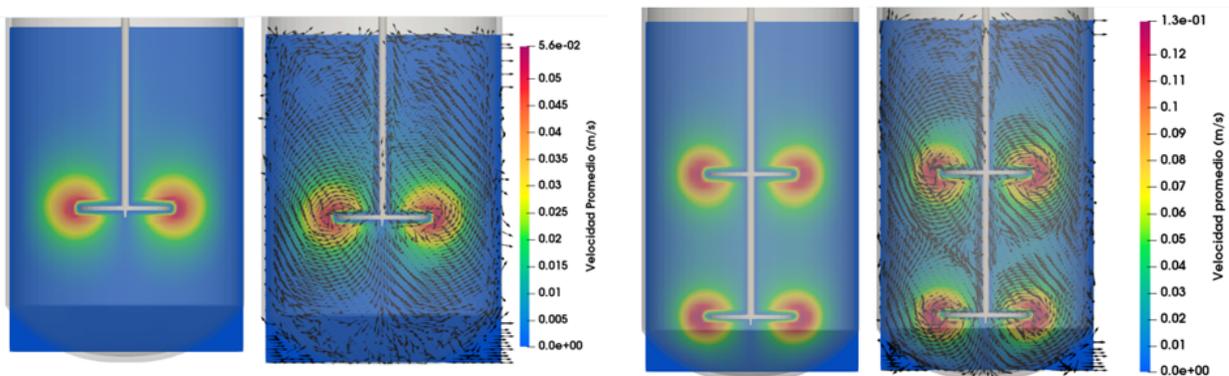


Figura 8. Campos de velocidad promedio de los últimos 30 segundos de agitación. Los vectores muestran la dirección de la vorticidad indicando los vórtices formados por la agitación.

La Figura 9 nos permite contemplar nuevamente una comparación de la vorticidad para cada agitador; del inciso a) notamos como las áreas con colores más intensos representan regiones de alta vorticidad, indicando fuertes giros y rotaciones del fluido en esas zonas. Estas regiones suelen formarse cerca de las palas del agitador Rushton debido a la fuerza que impone al fluido. Por el contrario, las zonas de baja vorticidad, con colores más suaves, indican áreas de flujo más estable y menos perturbado, lo que sugiere un patrón de mezcla limitado a la región cercana al disco. El inciso b) presenta una distribución más compleja de vorticidad por la interacción de los dos agitadores, lo que indica mayor turbulencia y una mejor mezcla que el agitador sencillo; los colores más variados hablan de una mezcla más eficiente y homogénea. El rojo corresponde a valores positivos y el azul valores negativos, y el rango para a) es de -1.5 a 1,5, mientras que para b) va de -3 a 3, esto indica que hay una variación superior de vorticidad en el agitador doble.

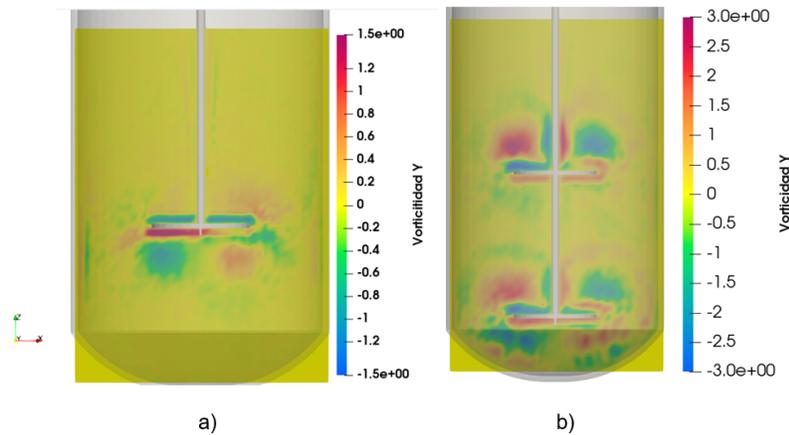


Figura 9. Vorticidad de la velocidad promedio de los últimos 30 segundos de agitación.

La Figura 10 está representando el Criterio Q en nuestro sistema el cual nos da pauta para identificar y estudiar la dinámica de los vórtices y las estructuras turbulentas en el flujo. En el tanque sencillo, el criterio Q muestra áreas rojas de alta concentración en torno al único impulsor, lo que nos dice que hay estructuras turbulentas en esa región. El color azul indica valores negativos de Q que sugieren la existencia de vórtices y zonas de recirculación. Del tanque doble es posible examinar que presenta una distribución más compleja del criterio Q, las áreas de alta concentración de movimiento se localizan alrededor de ambos impulsores, mientras que las zonas azules están más dispersas haciendo alusión a una mezcla más uniforme a lo largo del tanque; al igual que en otros parámetros evaluados se observa un rango mayor en la escala del inciso b).

Finalmente, en la Figura 11 se muestra la curva de porcentaje de mezclado en función de tiempo, donde se comprueba que el agitador doble genera un mezclado más rápido, sin embargo, en ambos casos se necesita mayor tiempo de agitación para alcanzar el tiempo de mezclado.

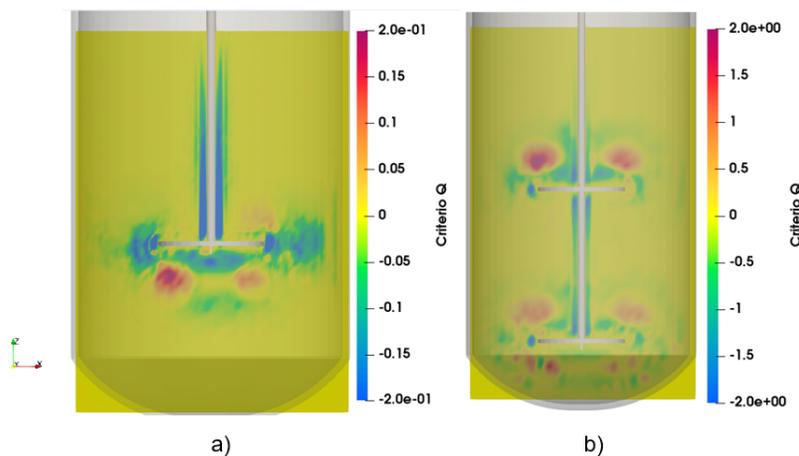


Figura 10. Criterio Q en la hidrodinámica al interior del tanque.

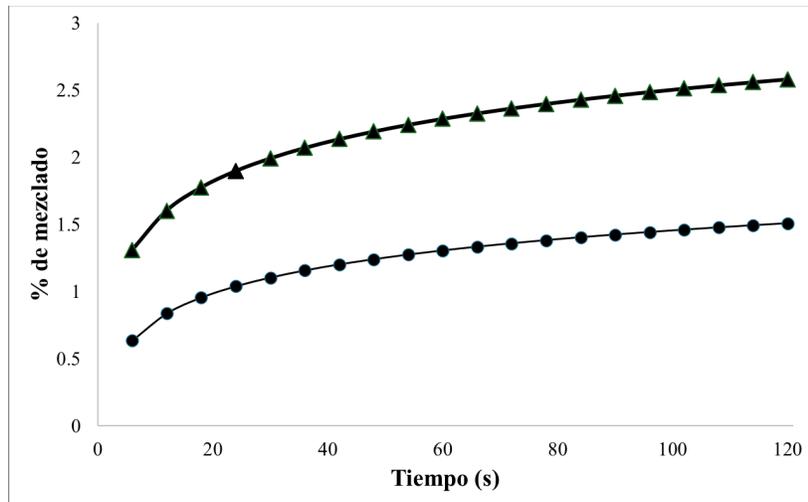


Figura 11. Curva de porcentaje de mezclado en función del tiempo para ambos agitadores. El marcador en triángulo corresponde al agitador doble y el marcador en círculo corresponde a la curva del agitador sencillo.

## Conclusiones

En la Figura 11 conseguimos examinar que tanque agitado es más efectivo de acuerdo con la relación de porcentaje de mezclado y tiempo, donde el tiempo se encuentra en segundos. El agitador tipo Rushton sencillo comienza en un 0.6% de mezclado aproximadamente la curva que presenta tiene una pendiente menos pronunciada al inicio, insinuando que la mezcla se realiza de manera más lenta en los primeros momentos, se estabiliza alrededor de 1.3% de mezclado después de 60 s y no muestra un aumento significativo posterior. En cuanto a la línea que representa el tanque agitado tipo Rushton doble podemos decir que inicia en un 1.2% de mezclado relativamente, pero muestra una subida más rápida en los momentos nacientes de la curva la pendiente de esta es más pronunciada el principio, sugiriendo una tasa de mezclado inicial superior a la del caso a), la línea continua ascendiendo hasta equilibrarse en un porcentaje de mezclado alrededor de 2.5%, lo que se concluye en una mezcla más eficiente y homogénea en el mismo tiempo. Además, el caso b) demuestra una velocidad de mezclado inicial más alta, lo que habla de una capacidad sobresaliente para integrar los componentes prontamente. En resumen, la gráfica muestra que el tanque agitado tipo Rushton doble proporciona una mejor operatividad en comparación con el tanque sencillo, lo que puede ser ventajoso en aplicaciones industriales que requieren una homogeneidad alta en menos tiempo.

Después de haber analizado más profundamente cada uno de los parámetros que se establecieron para valorar cual es la mejor opción operativa entre un agitador tipo Rushton sencillo y un agitador tipo Rushton doble, se ha llegado a la siguiente inferencia, la acción de un solo agitador genera movimiento principalmente alrededor de este mismo con una influencia mínima en otras partes del tanque lo que puede resultar en zonas menos mezcladas en el sistema, por lo tanto la eficiencia de la mezcla puede ser insuficiente para procesos que requieren una homogeneidad alta en toda la solución, sin embargo, podría ser más adecuado para procesos donde no se requiere un porcentaje alto de mezclado en todo el volumen. En cambio el tanque con agitador tipo Rushton doble produce una mayor interacción de la mezcla al tener dos impulsores colocados a diferentes alturas, crea un patrón de flujo más complejo y extenso que genera mayores permutas dentro del tanque que consecuentemente permite desarrollar una mezcla uniforme y eficaz a lo largo de todo el entorno contenido en el tanque, estas características lo hacen un modelo ideal para procesos que implican una mezcla en su totalidad o casi en su totalidad homogénea.

## Bibliografía/Referencias

Domínguez JM, Fourtakas G, Altomare C, Canelas RB, Tafuni A, García-Feal O, Martínez-Estévez I, Mokos A, Vacondio R, Crespo AJC, Rogers BD, Stansby PK, Gómez-Gesteira M. 2022. DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems. *Computational Particle Mechanics*, 9(5), 867-895. doi:10.1007/s40571-021-00404-2.

Uribe, A. R., Rivera, R., Aguilera, A., y Murrieta, E. (2012). AGITACION Y MEZCLADO. Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato. Repositorio Institucional de la Universidad de Guanajuato. [http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/6256/1/3\\_Agitaci%c3%b3n %20y%20mezclado.pdf](http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/6256/1/3_Agitaci%c3%b3n%20y%20mezclado.pdf)

Rodríguez, J.C., Luviano, J.L. & Vargas, J.C. (2018). Análisis de la hidrodinámica de fluidos en tanques agitados. *JOVENES DE LA CIENCIA Revista de Divulgación Científica*, Vol. 4 (no. 1), 5(2), 3036. Recuperado de <http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/6728/1/An%C3%A1lisis%20de%20la%20hidrodin%C3%A1mica%20de%20fluidos%20en%20tanques%20agitados%20RODRIGUEZ%20MOSQUEDA.pdf>

Chambergo, J.C., Valverde, Q., Pachas, A. A., & Yepez, H. (2017). Estudio del Comportamiento Fluido-Dinámico de un Agitador a Escala Reducida Mediante Simulación Numérica. *Información tecnológica*, vol. 28(3), 37-46. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000300005>

Gil, I. D., Guevara, J. R., García, J. L., Leguizamón, A., & Rodríguez, G. (2016). *Process Analysis and Simulation in Chemical Engineering*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14812-0>