

## Simulación numérica con CFD del proceso de mezclado para una solución agua-etanol al 50% utilizando agitadores de proximidad

CFD numerical simulation of the mixing process for a 50% water-ethanol solution using proximity impellers

Alvarado Rodríguez Carlos Enrique<sup>1\*</sup>, Hernández Rivera María Soledad<sup>2</sup>, Medina Elizarraraz Karen Guadalupe<sup>2</sup>, Domínguez Gómez María José<sup>1</sup>, José de Jesús Ramírez Minguela<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, Noria Alta S/N, CP 36050. ce.alvarado@ugto.mx

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Carretera Irapuato - Silao km 12.5 Colonia El Copal, Irapuato, Guanajuato, CP 36824.

### Resumen

En este trabajo se analizó mediante técnicas de CFD el proceso de mezclado para una solución 50% agua y 50% etanol en un tanque de medio litro a un número de Reynolds de 10000 utilizando tres tipos de agitadores diferentes nombrados: doble ribbon, paravisc e híbrido. A partir de simulación numérica, se obtuvieron perfiles de velocidad, densidad y sus gradientes dentro del tanque para comparar el movimiento y mezclado de cada agitador. La agitación se realizó en régimen turbulento con un número de Reynolds de 10000 simulando 2 minutos del proceso de mezclado. El agitador ribbon logró alcanzar un porcentaje de mezclado del 92.29% mientras que los agitadores paravisc e híbrido solo lograron un porcentaje de mezclado del 12.36% y 11.8%, respectivamente. Los resultados ayudan a concluir que el agitador ribbon es el que mejor mezcla la solución bajo estas condiciones de operación.

**Palabras clave:** CFD, SPH, Tanques agitados, doble ribbon, paravisc, híbrido.

### Introducción

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 (Chambergo, 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 varios diseños de agitadores industriales, dentro de ellos están los de proximidad, diseñados para trabajar a corta distancia de las paredes internas del tanque de mezclado, por lo que, los agitadores de proximidad se consideran un equipo con un diseño y ubicación específico. Se suelen usar en fluidos no Newtonianos y trabajan a bajas revoluciones en comparación a agitadores convencionales.

En este trabajo se utilizaron tres agitadores de proximidad para simular el proceso de mezclado de la solución: doble ribbon, paravisc e híbrido. El agitador doble Ribbon consiste en dos cintas helicoidales opuestas ajustadas en un eje, una de estas cintas tiene el trabajo de mover los materiales a mezclar en una sola dirección y la otra hace lo mismo que la anterior, sin embargo, lo hace en una dirección contraria, como consecuencia de estos movimientos los materiales que se mezclaran adquieren una sola dirección, haciendo que este sistema sea ideal para utilizarse como un mezclador continuo (Londoño, 2019). Este agitador generalmente es utilizado en las industrias para poder combinar materiales en polvo, granulados y materiales viscosos. La efectividad del proceso de mezcla dependerá de factores, como la velocidad de rotación, el diseño de las cintas, el tiempo de mezcla y las propiedades físicas de los materiales (Flores & Cuevas, 2008). Paravisc es un impulsor de proximidad que trabaja de manera eficiente con mezclas de alta viscosidad más, sin embargo, puede acoplarse a diferentes etapas del proceso con la posibilidad de cumplir una homogenización eficiente. Este tipo de impulsor al igual que el anterior trabaja dentro de un tanque de mezclado con geometría circular, en el cual existe una separación mínima con la pared interna de dicho tanque e igualmente el espacio entre las aspas y la superficie del fondo, lo que conlleva que la operación mecánica de este impulsor se haga circular a través de la acción del bombeo axial. Este tipo de impulsor puede trabajar sin problema con deflectores internos para mejorar la potencia, la transferencia de calor

y obtener un adecuado mezclado incorporando todos los sólidos del medio más viscosos. El agitador híbrido es un diseño novedoso reportado por Alvarado-Rodríguez et al., (2023) donde se reporta la eficiencia mejorada con respecto a otros agitadores de proximidad.

La simulación por Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha demostrado ser una herramienta valiosa para estudiar y optimizar procesos de mezcla, contribuyendo al desarrollo de procesos más eficientes (Yin, et al., 2022), ya que estos estudios permiten comprender mejor los fenómenos de transporte de masa y energía, así como los mecanismos de emulsificación, ofreciendo una forma numérica de abordar las ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos. (Zawawi, et al., 2018).

Por otra parte, la hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH) es una técnica avanzada y versátil para la animación de fluidos de última generación, este método para la dinámica de partículas lagrangianas y disipativas sin malla que transportan propiedades físicas como masa, posición, velocidad y presión rastreando sus trayectorias y cambios ofreciéndonos ventajas en el modelado de estos flujos complejos especialmente en grandes deformaciones y fenómenos en macro o meso escala, con la flexibilidad y capacidad de manejar geometrías y condiciones de contorno complejas. SPH sigue partículas de fluidos individuales calculando sus interacciones para simular el comportamiento del fluido esto contrasta con el enfoque euleriano, que fija puntos en el espacio y observa el flujo a través de ellos, estudiando como las propiedades cambian con el tiempo en ubicaciones específicas.

En este trabajo se simula numéricamente mediante técnicas CFD con el método SPH el proceso de mezclado para obtener una solución de agua-etanol al 50% partiendo de dos fases separadas. La finalidad de la investigación es generar una metodología para evaluar y analizar la hidrodinámica y procesos de mezcla en tanques agitados con agitadores de proximidad mediante simulaciones numéricas. Además, se realizará una comparación del proceso de mezcla al usar cada uno de los diseños de agitadores: doble ribbon, paravisc e híbrido.

## Metodología

En este trabajo se evaluó la concentración en un tanque de medio litro, para esto se utilizaron tres agitadores diferentes nombrados doble ribbon, paravisc e híbrido. El diseño de cada agitador se realizó mediante asistencia computacional (CAD) al igual que el diseño del tanque.

En la Figura 1, se muestran los dibujos realizados en CAD de los tres diferentes agitadores.



Figura 1. Dibujo en CAD de los tres diferentes agitadores, el inciso a muestra el dibujo en CAD del agitador ribbon; el inciso b muestra el dibujo en CAD del agitador Paravisc y finalmente el inciso c muestra el dibujo en CAD del agitador Híbrido.

Las simulaciones numéricas se realizaron utilizando el software DualSPHysics (Domínguez et al., 2022) el cual está basado en el método SPH. 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. 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 tres agitadores es de 33.9 rpm estableciendo un número de Reynolds de 10000. La velocidad inicial del agitador es cero y se acelera a 16.95 rpm 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 en el tiempo, así como la velocidad promedio después de 1.5 minutos de agitación. Los parámetros de los fluidos utilizados en la simulación se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Propiedades del agua, etanol y de la mezcla

	Agua	Etanol	Mezcla
Densidad	1000 kg/m <sup>3</sup>	789 kg/m <sup>3</sup>	894.5 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	1*10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	1.52*10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	1.17*10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>

Con los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones se obtuvo el porcentaje de mezclado en el tiempo simulado, así como los valores de velocidad promedio, y el gradiente, la divergencia y vorticidad de la velocidad promedio. También se analizó el criterio Q dentro de la hidrodinámica de los fluidos al interior del tanque. Además, se realizaron imágenes de los campos de densidad y gradiente de densidad en el interior del tanque agitado. Lo anterior para analizar cuál de los agitadores alcanza mayor porcentaje de mezclado en 2 minutos y relacionar este mezclado con la hidrodinámica generada por el agitador.

## Resultados

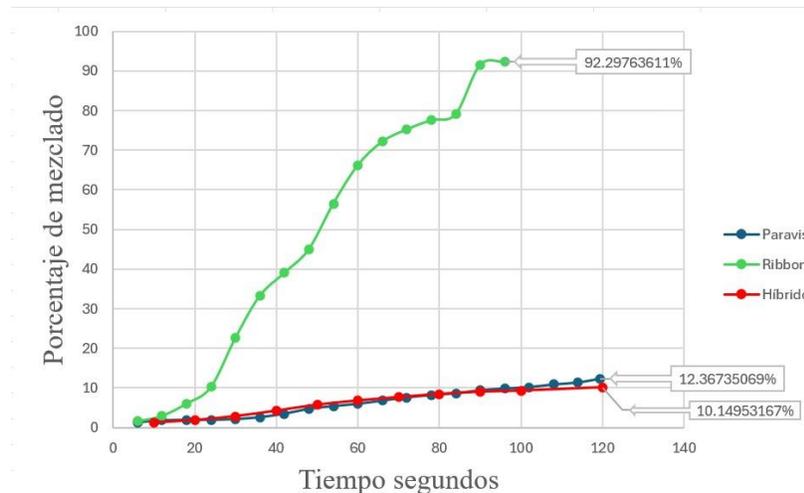


Figura 2. Porcentaje de mezclado de los tres diferentes agitadores.

En la Figura 2 se muestra el porcentaje de mezclado de los tres diferentes agitadores respecto al tiempo, la línea de color verde corresponde al agitador Doble Ribbon en ella se puede observar que a medida que aumenta el tiempo el porcentaje de mezclado también aumenta, esto en un tiempo de cada 6 segundos hasta llegar a los 96 segundos, teniendo un porcentaje de mezclado del 92.29%. En cambio, la línea de color azul corresponde al agitador Paravisc, la cual nos muestra que este agitador alcanzó un porcentaje de mezclado de 12.36% con un tiempo de 119.4 segundos, en ese tiempo el porcentaje de mezclado no llega a un valor constante, lo que significa que, según el tiempo, fuera aumentando, también iría en incremento. La línea roja corresponde al agitador híbrido, este agitador alcanza un porcentaje de mezclado de 11.8% con un tiempo de 120 segundos, concluyendo así que, como se observa en la gráfica, según vaya avanzando el tiempo,

El criterio Q nos sirve para evaluar la efectividad y la eficiencia de la mezcla en un sistema de agitación con agitadores de proximidad, El valor del criterio Q proporciona una medida de la eficiencia del agitador en términos de la cantidad de energía que se utiliza para mezclar un volumen determinado de fluido a una velocidad específica.

El criterio Q promedio de una simulación de fluido nos representa un parámetro utilizado para identificar estructuras coherentes de vorticidad en flujos turbulentos. En esta escala de colores, los colores positivos nos dan entender la presencia de estructuras de vorticidad en el fluido, mientras que los de valores negativos representarían las regiones donde las fuerzas de cizallamiento dominaban. Por último, los colores cercanos al amarillo o verde indican áreas con valores de Q cercanos a cero, donde ni la vorticidad ni las fuerzas de cizallamiento predominan.

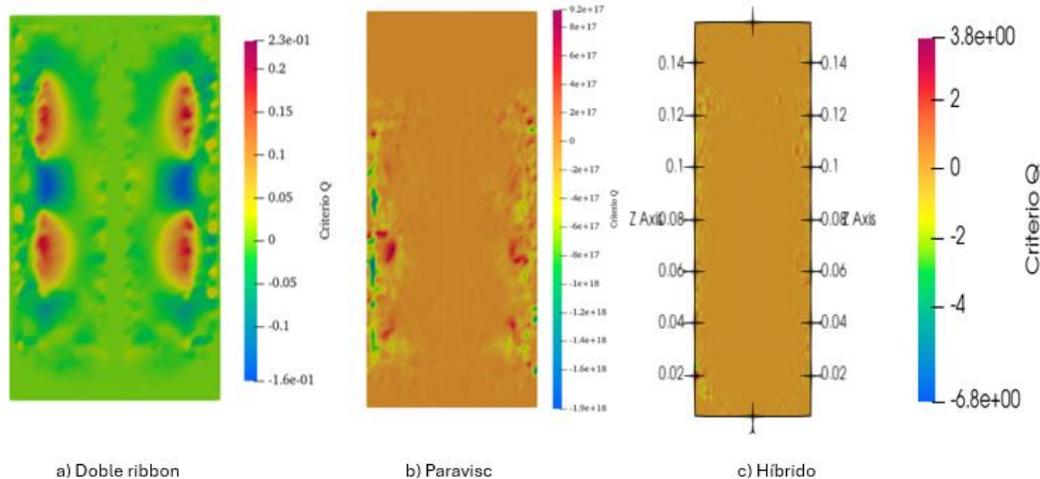


Figura 3. Criterio Q promedio de los tres diferentes agitadores.

En la Figura 3, se muestra el criterio Q para los tres diferentes tipos de agitadores, el inciso (a) representa al agitador doble ribbon, y se puede observar que los colores verdes y amarillos predominan, es decir, no predominan ni la vorticidad ni las fuerzas de cizallamiento, lo cual nos indica que el agitador ribbon está utilizando una cantidad de energía moderada para lograr que el agua y el etanol se mezclen, indicando que el sistema está operando con una eficiencia razonable. El inciso (b) corresponde al agitador Paravisc, donde se puede apreciar un color amarillo lo que demuestra una presencia moderada de vorticidad en estas áreas. En los bordes de ambos lados nos encontramos con colores verdes y azules, lo que nos indica regiones dominadas por la fuerza de cizallamiento. Colores intensos ya sea el rojo o azul, corresponde a zonas con fuerte vorticidad y cizallamiento respectivamente. Lo anterior nos indicaría que el fluido no es completamente homogéneo ya que existen regiones con distintas características dinámicas lo que representa formación de vórtices y estructuras turbulentas en el flujo. En el último inciso (c) que corresponde al agitador híbrido, se observa que prevalece el color naranja en su mayoría por lo que al igual que en el agitador paravisc demuestra poca presencia de vorticidad. Mientras que en las orillas toma colores ligeramente amarillos concluyendo una mínima presencia de vorticidad.

La divergencia promedio en tanques agitación se refiere al flujo de un fluido en un sistema cercano a las paletas del agitador, lo anterior se basa en la divergencia que mide la tasa en la que un fluido se expande o se contrae en un punto dado del espacio, entonces la divergencia nos indica del comportamiento general del flujo en dicha área, y permite optimizar el flujo dentro del tanque, lo que afecta la eficiencia y la calidad de la mezcla.

La divergencia se representa mediante una escala de colores, donde estos valores van de negativos a positivos. Los colores positivos (rojos y amarillos) de la divergencia representarían las áreas del fluido que están expandiéndose o divergiendo. En cambio, los colores en negativo (amarillo o verde) de divergencia nos indicaría las áreas del fluido que se encuentran contrayéndose o convergiendo.

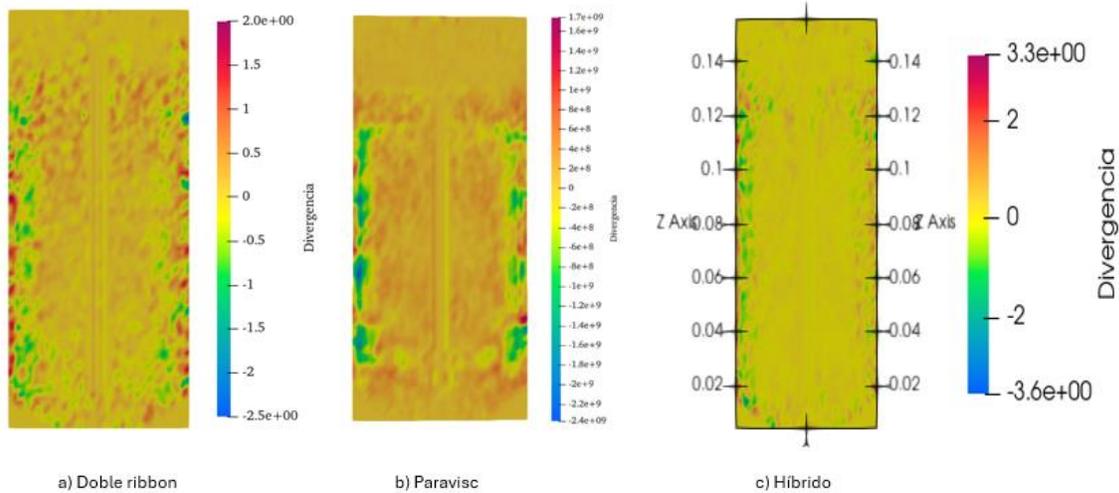


Figura 4. Divergencia promedio de los tres diferentes agitadores.

En la Figura 4, se muestra la divergencia promedio de los tres diferentes agitadores, el inciso (a) corresponde al agitador doble ribbon, aquí se puede apreciar un color amarillo, lo cual nos indica que el fluido está siendo empujado hacia afuera desde esa región a una tasa significativa, es decir, el agitador tiene una agitación fuerte y una tasa de expansión del fluido significativa. Si observamos la imagen en el borde derecho e izquierdo se observa un color verde lo que indica la presencia de regiones con convergencia. El inciso (b) corresponde al agitador Paravisc, donde se puede observar que en la región central hay una zona mayormente en color amarillo, lo que representa la expansión uniforme y tranquila del fluido en esa área. Por otro lado, dentro de los bordes izquierdo y derecho se puede observar colores negativos, lo cual indica regiones de convergencia del fluido. En las pocas áreas donde se puede llegar a ver colores intensos como el rojo y azul oscuro es debido a la mayor intensidad de divergencia y convergencia en ese lugar en específico. Toda la variación de divergencia descrita anteriormente nos da entender que el comportamiento dinámico del fluido no es homogéneo. Finalmente, el inciso (c) corresponde al agitador híbrido, aquí se observa cómo predomina el amarillo, por lo que el fluido se expande uniformemente. En las orillas predomina el verde concluyendo que hay poca convergencia.

La velocidad promedio hace referencia a la velocidad promedio del fluido en la región cercana al agitador, ofreciendo una idea de cómo es que el fluido se comporta en consecuencia a la acción del agitador. La velocidad promedio indica que tan rápido se mueve el fluido cerca del agitador, esta es importante para poder evaluar y optimizar la eficiencia de la mezcla, pues ayuda a asegurar que la mezcla sea homogénea y eficiente.

En la escala de colores de la velocidad promedio del fluido tenemos colores que van del valor 0 al valor  $5.6 \times 10^7$  para el caso del Paravisc, en el agitador Ribbon llega hasta un valor de  $5.0 \times 10^{-2}$ . Los colores de los valores más altos, que serían el naranja y el rojo, serían las regiones con mayor velocidad promedio del fluido, los verdes o amarillos serían velocidades intermedias y una velocidad media menor, el azul.

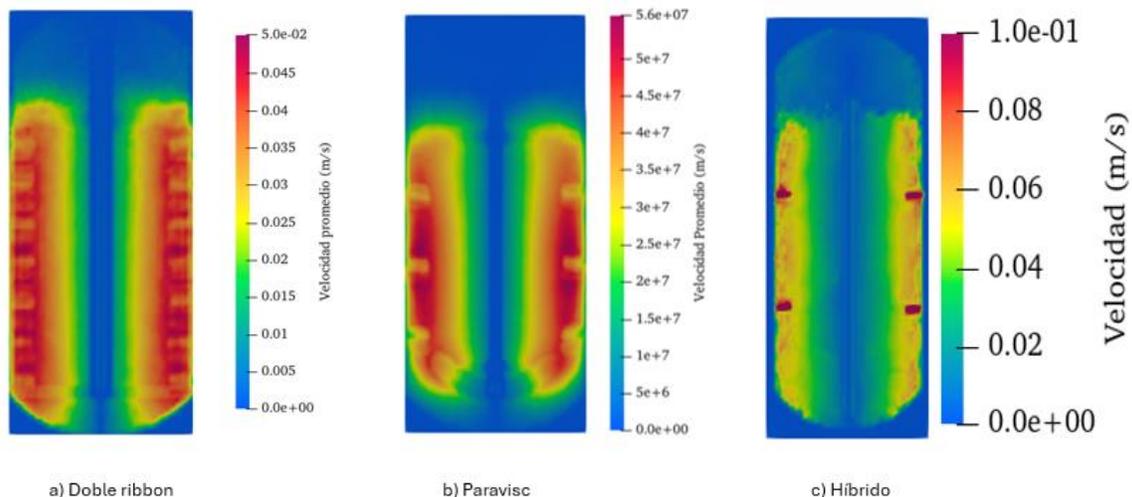


Figura 5. Velocidad promedio de los tres diferentes agitadores.

En la Figura 5 se muestra la velocidad promedio de los tres diferentes agitadores, el inciso (a) representa al agitador doble ribbon, esto nos indica que para una mezcla de etanol y agua esta velocidad puede ser suficiente para poder lograr una mezcla homogénea ya que ambos líquidos son miscibles y se mezclan fácilmente, esta velocidad puede ser beneficiosa para que no se llegue a una formación de espumas. El inciso (b) corresponde al agitador Paravisc, aquí se nos muestra que en la distribución de la velocidad promedio del fluido existen zonas de alta velocidad concentradas en el centro de las columnas, esto se puede deber a las condiciones de contorno específicas o a la dinámica interna de la mezcla de los dos fluidos agua y etanol. Las áreas que se muestran con una mayor velocidad pueden ser indicativas a turbulencia o donde flujo se vería forzado a moverse rápidamente, lo cual afectaría significativamente a la mezcla y el transporte de masa y calor en el sistema. El inciso (c) corresponde al agitador híbrido concluyendo con la figura mostrada que hay mayor velocidad al centro del agitador, sabiendo así que el fluido tenderá a comportarse de acuerdo con que tan rápido gira el agitador.

El gradiente promedio hace referencia a la tasa de cambio de la velocidad del fluido en la región cercana del agitador, este nos ayuda a entender cómo es que se distribuyen las fuerzas de corte (un gradiente promedio alto va a indicar fuerzas de corte en el fluido, esto puede ayudar a romper partículas mejorando la dispersión y con ello la homogenización), y la turbulencia del fluido (un gradiente alto indica mayor turbulencia lo que hace que se mezcle el o los fluidos rápidamente y de manera eficiente).

En el lado derecho de las siguientes imágenes se encuentran las escalas de colores que representan los valores del gradiente, por ejemplo, el gradiente promedio del agitador Paravisc de la escala de color tiene un rango desde (0.0e+00) hasta (1.5e+10). Los colores de esta escala indican la intensidad del gradiente, donde el azul representa los valores más bajos y el rojo los valores más altos.

Las zonas en color azul nos dicen que son áreas con un gradiente bajo, lo que conlleva una menor variación de las propiedades del fluido en esas regiones, en cambio cuando estas zonas sean color verde, amarillo e incluso rojo, es debido a que el gradiente es más alto.

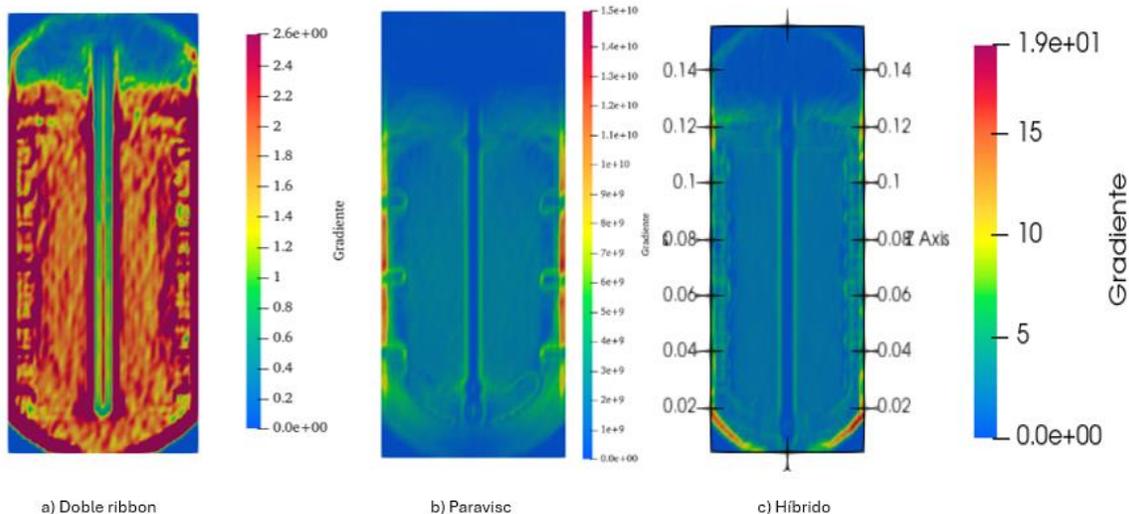


Figura 6. Gradiente promedio de los tres diferentes agitadores.

En la Figura 6 el inciso (a) corresponde al agitador ribbon, donde se puede observar que el color del gradiente es en su mayoría rojo y amarillo, es decir que existe un gradiente alto, esto quiere decir que existe un movimiento de fluido más intenso, lo cual nos indica que las fuerzas de corte en la región cercana al agitador son significativas, ayudando a que se rompa cualquier acumulación, dispersando rápidamente el etanol en el agua y logrando una mezcla homogénea, también indica un nivel alto de turbulencia lo cual ayuda a evitar zonas de estancamiento y a dispersar los componentes de la mezcla. En el inciso (b) corresponde al agitador Paravisc, se puede observar un patrón con concentraciones de valores altos estos sobre los bordes de la geometría del tanque en color rojo. Los colores azul y verde los encontramos más en áreas centrales lo cual representa que en esa zona hay gradientes menos pronunciados y por ende valores más bajos. Así mismo, el inciso (c) corresponde al agitador híbrido donde predomina más el color azul indicando que en el centro hay gradientes menores emitidos, se observa que carece de color rojo, concluyendo que para este tipo de agitador el gradiente es bajo, indicándonos que no hay fuerzas de corte en el fluido. Un gradiente alto nos puede indicar que en esas zonas hay una mayor transferencia de calor o bien, que el movimiento del fluido sea más intenso. Estos resultados nos pueden ayudar a identificar si existen zonas críticas donde es necesario medidas adicionales de control o si ocurre un punto importante a revisar como ya sea una mezcla turbulenta o transferencia de masa.

La vorticidad promedio hace referencia a la medida de la rotación del fluido en la región cercana del agitador, describe la tendencia de las partículas del fluido a girar alrededor de un punto, es un vector que da una idea sobre la circulación del fluido y está relacionada directamente con la turbulencia (la vorticidad promedio alta indica un nivel alto de turbulencia, lo que puede mejorar la mezcla y la homogeneización), y el mezclado en el tanque. Las imágenes a continuación muestran la distribución de la vorticidad promedio en el tanque con su respectivo agitador y el fluido simulado. En estas imágenes encontramos a su lado derecho la escala de colores que indicará los valores de vorticidad, en esta representación de la magnitud de la vorticidad, el azul nos indica valores bajos de vorticidad que significa menor rotación del fluido y tanto el rojo, verde y amarillo, al ser los valores más altos, implica que hay mayor rotación del fluido. Esta distribución de vorticidad ayuda a tener una visión más detallada de las áreas del fluido donde hay mayor o menor rotación, lo que es importante para entender el comportamiento dinámico de fluido.

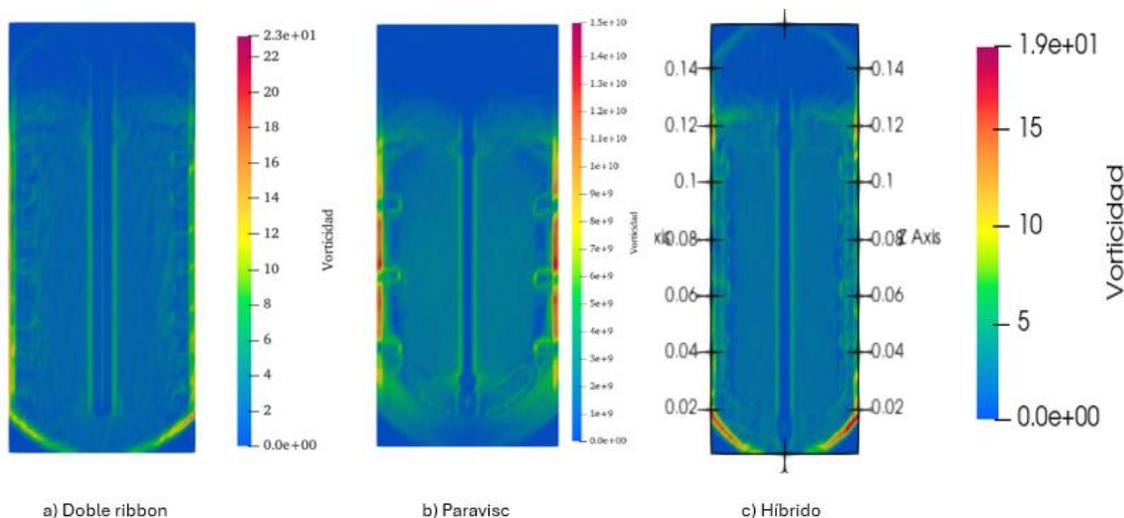


Fig 7. Vorticidad promedio de los diferentes agitadores.

En la Figura 7, se muestra la Vorticidad promedio de los diferentes agitadores, el inciso (a) corresponde al agitador doble Ribbon, que como se puede observar la vorticidad tiende a una distribución uniforme, esto sugiere que el agitador está creando un campo de flujo donde la rotación del fluido es constante, es decir que existe una mezcla homogénea y eficiente, esto significa que el agitador está funcionando de manera óptima y no existen zonas de estancamiento. El inciso (b) corresponde al agitador Paravisc donde se puede observar zonas de alta vorticidad entre los colores rojos y amarillos en los bordes de las paredes del tanque y en otros puntos más específicos, esto se puede deber a la interacción que existe entre el fluido y las paredes. En las áreas más centrales hay valores más bajos de vorticidad lo que indica menor actividad rotacional específicamente en esa zona, lo cual lo podemos observar por sus colores azul y verde. Por último, el inciso (c), corresponde al agitador híbrido teniendo un comportamiento persistente, describiendo como es la tendencia entre las partículas, así mismo indica una baja vorticidad por lo que no hay necesidad de mejorar la mezcla o la homogeneización.

## Conclusión

En el presente estudio, se llevó a cabo simulaciones utilizando SPH y ParaView entre otros Software como es Solid Works, para evaluar el rendimiento de tres tipos de agitadores: Doble Ribbon, Paravisc y un diseño híbrido. Los experimentos se realizaron con una mezcla de 50% de agua y 50% de etanol. Los resultados obtenidos nos indican que el agitador Doble Ribbon tuvo un desempeño significativamente superior en comparación con el Paravisc y el híbrido, teniendo una eficiencia de mezcla del 92.29% en tan solo 96 segundos, este agitador demostró tener una capacidad de mezcla rápida y efectiva. Por otro lado, los agitadores paravisc e híbrido mostraron rendimientos mucho menores, con eficiencias de mezcla de 12.36 y 11.8 por ciento respectivamente, con tiempos de operación superiores a los 120 segundos. El agitador Doble Ribbon con su diseño de dos cintas entrelazadas, proporciona un flujo más uniforme y turbulento dentro del tanque, lo que facilitó que la mezcla fuera rápida y homogénea. Por tanto, esta configuración permite que las partículas del fluido se dispersen y se mezclen de manera eficiente. En cambio, los otros dos diseños de agitadores no pueden generar la misma cantidad de turbulencia o suelen presentar zonas muertas lo que provoca que la mezcla no ocurra de manera efectiva reduciendo su eficiencia.

Se ha demostrado que la dinámica del fluido con el agitador Doble Ribbon, es más favorable para la mezcla de líquidos con diferentes viscosidades y densidades, como es el caso del agua y etanol. Además, con las simulaciones en SPH se demostró que la agitación que se generó con el Doble Ribbon crea vórtices y corrientes que provocan la aceleración del

proceso de mezclado, en cambio el paravisc e híbrido por su diseño menos agresivo se ven limitados a generar este tipo de vórtices.

Esta superioridad de diseño permite una homogenización rápida y completa, reduciendo así ves el tiempo del proceso y mejorando la calidad final de la mezcla, debido a la capacidad de generar un flujo turbulento efectivo en una solución de agua y etanol.

## Bibliografía/Referencias

- Chambergó, 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>
- Flores, C. J., & Cuevas, C. N. (2008). Diseño de una mezcladora dosificadora de cremas cosméticas. [Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital - EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/614/1/CD-1576%282008-07-09-11-21-43%29.pdf>
- 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>
- Londoño, J. (2019). Propuesta de mejora en la línea de vegetales para la empresa PANAMERICANA DE ALIMENTOS SAS, mediante un sistema automático de transporte dosificación y mezcla de granos. [Tesis de licenciatura, INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO]. Repositorio Institucional ITM. [https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/2080/Rep\\_Itm\\_pre\\_Londo%C3%B1o.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/2080/Rep_Itm_pre_Londo%C3%B1o.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Miño Valdés, J. E., Benítez Cortés, I., & Pérez Martínez, A. (2020). Simulación de procesos químicos y aplicaciones del simulador SuperPro Designer. Universidad Nacional de Misiones. [https://rid.unam.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12219/3008/Mi%C3%B1o%20Vald%C3%A9s%20y%20otros\\_%202020\\_Simulaci%C3%B3n%20de%20procesos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rid.unam.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12219/3008/Mi%C3%B1o%20Vald%C3%A9s%20y%20otros_%202020_Simulaci%C3%B3n%20de%20procesos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- 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>
- 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)
- Ye, T., Pan, D., Huang, C., & Liu, M. (2019). Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for complex fluid flows: Recent developments in methodology and applications. *Physics of Fluids*, 31(1). <https://doi.org/10.1063/1.5068697>
- Yin, C., Zheng, K., He, J., Xiong, Y., Tian, Z., Lin, Y., & Long, D. (2022). Turbulent CFD Simulation of Two Rotor-Stator Agitators for High Homogeneity and Liquid Level Stability in Stirred Tank. *Materials*, 15(23), 8563. <https://doi.org/10.3390/ma15238563>
- Zawawi, M. H., Saleha, A., Salwa, A., Hassan, N. H., Zahari, N. M., Ramli, M. Z., & Muda, Z. C. (2018). A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). In *AIP conference proceedings*, vol. 2030, No. 1. <https://doi.org/10.1063/1.5066641>