

Simulación dinámica computacional en tanques agitados de fondo cónico con turbina Rushton y de palas inclinadas



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 20/ Edición N.40
Julio - diciembre de 2023
Reia4010 pp. 1-22

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Arismendy, J. E.; Quintana Marín, G.C.; Alzate Gil M. H.; Hincapié D. A.; Cardona Palacio, L. F.
Simulación dinámica computacional en tanques agitados de fondo cónico con turbina Rushton y de palas inclinadas
Revista EIA, 20(40), Reia4010, pp. 1-22.
<https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1676>

✉ Autor de correspondencia:

Cardona Palacio, L. F. (Luis Fernando)
Ingeniero Químico
Universidad Pontificia Bolivariana,
Universidad Católica Luis Amigó
Correo electrónico:
luisfernando.cardonapa@upb.edu.co

Recibido: 23-01-2023

Aceptado: 15-05-2023

Disponible online: 01-06-2023

JUAN E. ARISMENDY¹
GERMAN CAMILO QUINTANA MARÍN¹
HADER HUMBERTO ALZATE GIL¹
DIEGO A. HINCAPIÉ²
✉ LUIS FERNANDO CARDONA PALACIO³

1. Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia
2. Instituto Tecnológico Metropolitano - Colombia
3. Universidad Católica Luis Amigó - Colombia

Resumen

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD en inglés) es una herramienta de uso frecuente para la optimización y mejora de procesos. En este trabajo se utilizó la simulación CFD para analizar la potencia más apropiada en sistemas agitados con tres diferentes tipos de conos en el fondo del tanque y con dos tipos de impulsores: turbina de 4 palas inclinadas a 45° (impulsor axial) y turbina Rushton estándar (impulsor radial). La simulación se realizó en un tanque agitado con un diámetro de 27 cm y se analizó diferentes proporciones del diámetro y altura del cono. Además, se evaluaron 4 velocidades de giro (50, 100, 300 y 600 rpm) para describir el estado de transición a turbulento. Se utilizó el modelo de esfuerzo de Reynolds (RSM en inglés) con un sistema de referencia móvil. Los resultados de este estudio indican que hay disminución de la potencia con el impulsor de tipo axial a bajos números de Reynolds mientras que para el impulsor de tipo radial se presenta un aumento en los valores de potencia cuando se incluye el cono dentro del tanque. Al incrementar el número de Reynolds se tiene un incremento exponencial de la potencia-volumen de cada impulsor. Además, la inclusión de un impulsor de 4 palas inclinadas en un régimen entre laminar y transición evidencia un ahorro significativo en el consumo de potencia y para regímenes turbulentos la inclusión de geometrías en el fondo del tanque afecta el consumo de potencia. Finalmente, los resultados son validados utilizando datos experimentales y muestran que las desviaciones absolutas son menores al 4 %.

Palabras clave: Tanques agitados, Dinámica de Fluidos Computacional, modelos de turbulencia, número de potencia, turbina Rushton, impulsor axial, Reynolds, RSM, optimización, procesos.

Computational fluid dynamics simulation in cone-bottom stirred tanks with a Rushton and pitched-blade turbines

Abstract

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a tool frequently used for the optimization and improvement of industrial processes. In this work, the CFD simulation is used for analyzing the appropriate power in stirred-tank systems with three different types of cones at the bottom of the tank and with two types of impellers: 45° pitch 4-bladed turbine (axial impeller) and Rushton standard turbine (radial impeller). The simulation was carried out in a stirred tank with a diameter of 27 cm and with different cone diameters and height ratios are analyzed. Also, 4 rotation speeds (50, 100, 300, and 600 rpm) were evaluated to describe the transition to turbulent states. Reynolds Stress Model (RSM) and the Moving Reference Frame are used. The results show that the power decrease with the axial impeller when this is operated at low Reynolds number values meanwhile the radial impeller presented an increase in the values of power when the cone is introduced inside the tank. By increasing the Reynolds number an exponential increase in the power volume of each impeller is made. Also, the inclusion of a 4-impeller blade inclination between laminar and transition shows a significant saving in power consumption and for turbulent regimes, the inclusion of geometries in the bottom of the tank affects power consumption. Finally, the results are validated using experimental data and show that the absolute deviations are below 4 %.

Keywords: Stirred tanks, Computational Fluid Dynamics, turbulence models, power number, Rushton turbine, axial impeller, Reynolds, RSM, optimization, processes.

1. Introducción

Los sistemas agitados son usados en diferentes tipos de industrias de procesos tales como en la minería, en las reacciones de polimerización, la cristalización, la farmacéutica, entre otras (Pukkella et al., 2019). En el caso de los procesos que involucran la interacción sólido-líquido, líquido-líquido o gas-líquido el estudio en los sistemas agitados pretende mejorar las condiciones operacionales y de mezcla (Naeeni y Pakzad, 2019). La optimización en tanques agitados está relacionada con las variables operacionales y geométricas (tipo de impulsor, número de deflectores, cantidad de impulsores, tipo de tanque). La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) se ha convertido en una herramienta versátil a la hora de mejorar procesos industriales, ya que permite analizar el comportamiento hidrodinámico de sistemas complejos, flujos turbulentos y multifásicos, como es el

caso de los sistemas agitados con sólidos en suspensión (Guha, et al., 2008). Las ventajas de trabajar con CFD en sistemas agitados radica en el diseño, ya que la simulación utilizando CFD ofrece información sobre los campos de flujo donde se presentan mayor turbulencia y mayores pérdidas de energía dentro del tanque (Micale et al., 2000; Pukkella et al., 2019). Además las simulaciones se basan en procesos con dimensiones reales por lo que se evitan las incertidumbres que se generan en el escalado (Micale et al., 2000). Por otro lado, una de las condiciones importantes para el uso de CFD como herramienta computacional es la validación mediante pruebas experimentales. Coroneo, et al. (2011) muestran que una buena discretización de la malla y parámetros adecuados de simulación de los modelos de turbulencia ayuda a obtener resultados acordes con los valores experimentales.

Diferentes autores (Ochieng et al., 2008; Joshi et al., 2011) indican que la selección del tipo de impulsor (radial o axial) es importante ya que éste tiene fuerte influencia en los resultados del sistema agitado, ya que una selección equivocada del impulsor puede conllevar a ineficiencias en los procesos y pérdidas significativas de dinero (Ochieng et al., 2008). Por ejemplo, Joshi et al., (2011a,b) presenta en dos artículos de revisión científica con reactores de tanque agitado empleando impulsores de flujo radial y axial. En el primer artículo (Joshi, et al., 2011a) analiza los reactores en fase simple y en flujo turbulento empleando impulsores de tipo radial. Estos autores incorporaron diferentes modelos de turbulencia y sistemas de referencia móvil. Los resultados se compararon frente a mediciones con anemómetro láser y se destaca que los modelos de turbulencia $\kappa - \epsilon$ modificados y RSM (del inglés Reynolds Stress Model) muestran resultados satisfactorios. En el otro artículo (Joshi, et al., 2011b), presenta una revisión bibliográfica para impulsores de tipo axial, con la inclusión de múltiples impulsores y dispersiones multifásicas. Estos autores indican que para las suspensiones de sólidos es importante determinar la velocidad crítica del impulsor ya que más energía de la necesaria es inútil e ineficiente en el proceso, debido a que existe alto riesgo de que las partículas se acumulen en las esquinas y fondo del tanque. Pukkella et al. (2019) realizan un estudio para diseñar un sistema de mezcla óptimo con su deflector. Estos autores emplearon el enfoque de volumen de fluido (en inglés Volume of Fluid con el acrónimo VOF) y el seguimiento de las partículas (mezclas sólido-líquido) utilizando un enfoque Lagrangiano. El deflector se coloca en la interfaz líquido-aire en un tanque piloto de 100 L de capacidad. Los resultados muestran que el diseño propuesto proporcionó las mejores características de mezclado en comparación con sistemas sin y con deflectores.

Dong, et al. (2016) desarrollaron simulaciones comparando un fondo de tanque plano y un fondo circular, con el fin de mejorar la recirculación en las esquinas. Los resultados muestran que en régimen turbulento se forma una zona muerta en el centro debido a la alta recirculación y a la generación de alta velocidad tangencial. Una alternativa para aumentar la energía en el centro del tanque es la empleada por Li, et al. (2018) para procesos de gas-líquido. Estos autores suministraron una corriente de aire en el centro del eje de un impulsor tipo Rushton para mejorar el coeficiente de transferencia de masa. Lo anterior ayudó en la eficiencia ya que permite una recirculación con mayor velocidad y ahorra el consumo de potencia debido a que activa la energía cinética turbulenta que se encuentra en el centro del tanque. Otra variable importante en procesos de mezcla es el volumen empleado en la agitación (Motamedvaziri y Armenante, 2012). Motamedvaziri y Armenante (2012) estudiaron el efecto del volumen variando el nivel del líquido en el tanque y concluyen que los sistemas agitados se pueden operar efectivamente solo dentro de ciertos rangos de las variables operativas sin comprometer la efectividad de mezclado. Además, al disminuir el volumen, en algunos casos, ayuda a la efectividad de mezcla en los sistemas agitados (Motamedvaziri y Armenante, 2012; Ochieng y Onyango, 2008).

No obstante, el estudio de tanques agitados y su optimización es un tema actual que está siendo investigado (Wutz et al., 2020). En este trabajo se evalúa la inclusión de diferentes geometrías en el fondo del tanque (turbina Rushton estándar, turbina de 4 palas inclinadas a 45° y cono) con el propósito de realizar un análisis energético que posibiliten conocer su eficiencia en diferentes regiones del fluido como el transitorio y el turbulento. Además, para cada geometría se analiza el comportamiento hidrodinámico del fluido. Finalmente se realiza una validación mediante datos experimentales que permitan conocer la bondad y robustez de la simulación.

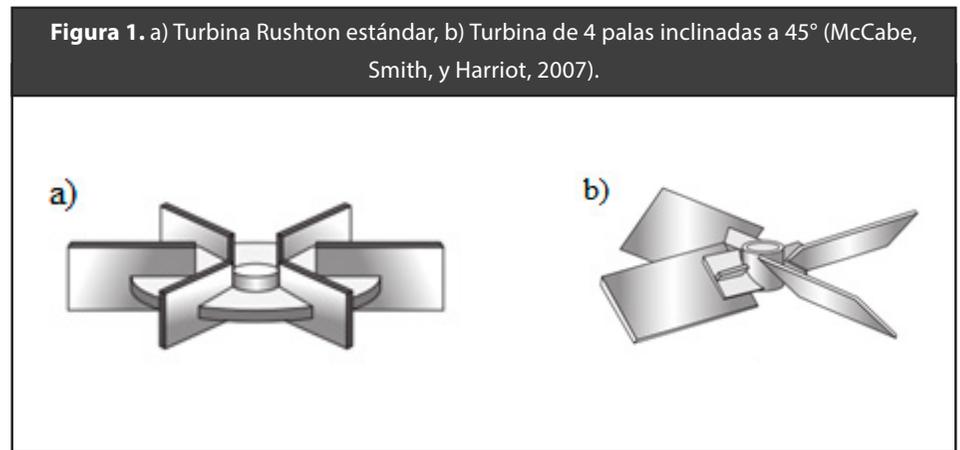
2. Metodología

La siguiente metodología es desarrollada en este trabajo y se detalla a continuación.

2.1. Detalles del Sistema agitado

En este estudio las dimensiones del sistema agitado son las mismas que utilizó Wu y Patterson (1989). Estos autores realizaron un estudio experimental de los patrones de flujo de un tanque cilíndrico con 4 deflectores, un diámetro (T) de 27 cm agitado con una turbina

Rushton estándar con diámetro (D) es 9.3 cm. Como fluido de proceso se empleó agua a temperatura y presión ambiente $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 1 atm ($\rho=998.2\text{ kg/m}^3$ y $\mu=10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Daubert, 1998), y la velocidad de giro fue de 200 rpm. Bajo esas condiciones se desarrollaron simulaciones mediante CFD para validar y corroborar que los resultados experimentales coinciden con los valores simulados. En la Figura 1 se ilustran dos variaciones en el sistema agitado, el primero (Figura 1a) es del tipo Rushton estándar y el segundo (Figura 1b) es de 4 palas inclinadas de 45° . Los dos impulsores conservan el mismo diámetro de 9.3 cm.



Para la construcción de los conos se tomó como base el diámetro del tanque ($T = 27\text{ cm}$) y se tomaron diferentes proporciones del diámetro y altura del cono para la construcción del sistema agitado. La Tabla 1 muestra los valores seleccionados al azar de los diámetros trabajados en este estudio.

Tabla 1. Proporciones geométricas del cono ubicado en el fondo del tanque.

	$D_{\text{cono}}\text{ (cm)}$	$H_{\text{cono}}\text{ (cm)}$
Cono 0	$0.6 \cdot T$	$0.2 \cdot T$
Cono 1	$0.44 \cdot T$	$0.07 \cdot T$
Cono 2	$0.185 \cdot T$	$0.2 \cdot T$

Se realizan simulaciones con impulsores de turbina Rushton estándar y turbina de 4 palas inclinadas con ángulo de 45° a 4 velocidades de

giro diferentes (50, 100, 300 y 600 rpm) con el objetivo de analizar el estado de transición a turbulento para cada cono. También se evaluó ambos impulsores. Las dimensiones del sistema agitado estudiado se muestran en la Figura 2.

Figura 2. Dimensiones del sistema agitado estudiado (Wu y Patterson, 1989)



2.2. Generación de la malla

El proceso de mallado tiene un efecto importante en la solución de las ecuaciones de gobierno de los problemas de CFD, ya que este ayuda a que un problema pueda encontrar la solución de manera correcta o este puede desestabilizar el sistema físico que se está trabajando. Además, es posible mejorar el tiempo de cómputo de acuerdo con el equipo computacional que se tenga. Para efectos de resolución de problemas para sistemas agitados se trabajó con mallas no estructuradas con un sistema patch independiente para garantizar dos tamaños diferentes. En la Figura 2 se tienen en cuenta todas las dimensiones del tanque y del impulsor con el cual se realizó la validación (comparación con datos experimentales), también se encuentra el volumen subdividido para optimizar la calidad de la malla. Para esta sección de volumen de trabajo (Montante et al., 2001) encontró que la localización exacta de la interfaz no afecta en los resultados por lo que se recomienda una distancia hasta el impulsor de 1 a 3 cm aproximadamente.

2.3. Simulaciones CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD en inglés) se basa en el análisis de sistemas que involucran mecánica de fluidos, transferencia de calor y sistemas reaccionantes (Versteeg y Malalasekera, 1995). Esta herramienta computacional busca realizar análisis de un sistema para posibilitar el diseño y optimización de un proceso industrial.

2.4 Modelos matemáticos utilizados para describir el sistema físico de tanque agitado

La selección de un modelo matemático se representa por un método de discretización para aproximar las ecuaciones diferenciales a un sistema de ecuaciones algebraicas para utilizar un método iterativo y obtener la solución al problema (Versteeg y Malalasekera, 1995). En la simulación utilizando CFD, las ecuaciones son discretizadas y se resuelven en una computadora, a partir de “puntos nodales” en los que se calcula la variable dependiente, que puede ser la temperatura, la concentración de algunos componentes químicos o, como en las ecuaciones de Navier-Stokes, la cantidad de movimiento. Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos incompresibles están usualmente descritas por ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y de Navier Stokes, las cuales pueden ser escritas con las Ecuaciones (1) y (2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \langle u_i \rangle)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \langle u_i' u_j' \rangle) + \rho g_i \quad (2)$$

Los subíndices $i, j=1,2,3$ representan los componentes del sistema coordinado, ρ indica la densidad del fluido, u_i denota la velocidad, p la presión y μ la viscosidad. Además el término $\rho \langle u_i' u_j' \rangle$ define el tensor de Reynolds y representa las fluctuaciones turbulentas en el flujo, por lo que existen varios modelos para representar este término (Delgadillo y Rajamani, 2005) y se describen en las siguientes sesiones.

2.5. Modelos de turbulencia

La turbulencia se basa en fluctuaciones en el campo de flujo, en el tiempo y en el espacio (Sheikhi, Najafi, y Enjilela, 2020). Es un proceso complejo, principalmente porque ocurre en tres dimensiones, es inestable y se compone de muchas escalas, por tal motivo, puede tener un efecto significativo sobre las características de la corriente. La turbulencia se produce cuando las fuerzas inerciales en el fluido se vuelven significativas en comparación con las fuerzas viscosas, y se caracteriza por valores altos del número de Reynolds. Los más simples de los “modelos completos” de turbulencia son los modelos de dos ecuaciones, en los cuales la solución permite determinar independientemente la velocidad turbulenta y las escalas de longitud. En el “modelo de turbulencia $k-e$ ”, se resuelven ecuaciones de equilibrio para la energía cinética turbulenta por unidad de masa, k , y la tasa de disipación de la turbulencia por unidad de masa, e , y una viscosidad turbulenta, μ_t , que se calcula a partir de estos dos parámetros (k y e). Lo anterior se utiliza para altos valores del número de Reynold y la viscosidad turbulenta debe ser isotrópica (ANSYS, 2009b).

2.5.1. Modelo de esfuerzo de Reynolds (RSM)

El modelo de esfuerzo de Reynolds (RSM) es el modelo más elaborado de turbulencia. Al abandonar la hipótesis de viscosidad turbulenta isotrópica, este modelo emplea las ecuaciones de Navier-Stokes de Reynolds-promedio mediante la solución de las ecuaciones de transporte para los esfuerzos de Reynolds y una ecuación para la tasa de disipación. Por lo tanto, para el caso de flujos en 3-D deben resolverse siete ecuaciones adicionales de transporte. Este modelo es limitado por las suposiciones empleadas para modelar diversos términos en las ecuaciones exactas de transporte para los esfuerzos de Reynolds. Además, el modelado de los términos de presión y la tasa de disipación son difíciles de ejecutar, y a menudo comprometen la exactitud de las predicciones (Versteeg y Malalasekera, 1995). En comparación con el modelo $k-e$, el RSM requiere más memoria y tiempo computacional debido al incremento del número de ecuaciones de transporte para los esfuerzos de Reynolds, asimismo, toma más iteraciones para converger que el modelo $k-e$, debido al fuerte acoplamiento entre los esfuerzos de Reynolds y la media de flujo. Sin embargo, se recomienda usar RSM cuando las características de interés en el flujo son el resultado de la anisotropía (ANSYS, 2009a).

La ecuación exacta del tensor de esfuerzos de Reynolds puede escribirse como se describe en la Ecuación (3).

$$\frac{\partial(\rho\langle u_i' u_j' \rangle)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\mu_k \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle)}{\partial x_k} = D_{ij} + P_{ij} + G_{ij} + \Phi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

Donde los términos de la izquierda representan el tiempo local derivativo y el término de convección en la derecha está representado por cinco términos relacionados con el modelo de difusión turbulenta (D_{ij}), la producción de tensión (P_{ij}), la producción de empuje (G_{ij}), el término de presión (Φ_{ij}) y el término de disipación (ε_{ij}). La presentación matemática de cada uno de los términos se describe a continuación.

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho\mu_k \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle \langle u_k \rangle) + p(\delta_{kj} \langle u_i \rangle' + \delta_{ik} \langle u_j \rangle') \quad (4)$$

$$P_{ij} = -\rho \left(\langle u_i \rangle' \langle u_k \rangle' \frac{\partial \langle u_j \rangle'}{\partial x_k} + \langle u_j \rangle' \langle u_k \rangle' \frac{\partial \langle u_i \rangle'}{\partial x_k} \right) \quad (5)$$

$$G_{ij} = -\rho\beta (g_i \langle u_j \rangle' \theta + g_j \langle u_i \rangle' \theta) \quad (6)$$

$$\Phi_{ij} = +p \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle'}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle'}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle'}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle'}{\partial x_k} \right) \quad (8)$$

Por otro lado, la energía cinética turbulenta, k (Ecuación 9) y la tasa de disipación turbulenta e (Ecuación 10), se resuelven mediante las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot k \cdot \langle u_i \rangle)}{\partial x_i} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ij} + G_{ij}) - \rho \cdot \varepsilon (1 + 2 \cdot M_t^2) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon \cdot \langle u_i \rangle)}{\partial x_i} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \cdot C_{\varepsilon 1} + \frac{1}{2} (P_{ij} + C_{\varepsilon 3} \cdot G_{ij}) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (10)$$

En las Ecuaciones (9) y (10), M representa el número de Mach y μ_t es la viscosidad turbulenta y se determina mediante la siguiente ecuación.

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

Los valores de las constantes que aparecen en el modelo están usualmente asignados así: $C_m = 0.09$, $s_k = 0.82$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$. $C_{\varepsilon 3}$ se evalúa como una función del flujo en dirección al vector gravitacional (ANSYS, 2009a; Delgadillo y Rajamani, 2005).

2.5.2 Método de mallas deslizantes (en inglés *Sliding Mesh*)

Las simulaciones del impulsor en 3D mediante CFD puede modelarse mediante el método de mallas deslizantes o sistema de referencia móvil. Este método es una aproximación para la simulación alrededor de partes móviles, y en este caso, el impulsor del agitador. El método consiste en simular un marco de referencia en movimiento. Esta metodología se realiza en estado transitorio a una velocidad de rotación constante. Para resolver las ecuaciones se realiza una transformación de coordenadas desde un marco de referencia estacionario al sistema de referencia móvil (Martínez y Valencia, 2010).

El método de mallas deslizantes es una solución dependiente del tiempo, en donde la malla adyacente al componente rotatorio se mueve durante la solución. El movimiento del impulsor es modelado de manera más realista ya que la malla aledaña sigue el movimiento del impulsor, dando una simulación más precisa entre impulsor y tanque (Martínez y Valencia, 2010).

2.6. El modelo de volumen de fluido (en inglés Volume of Fluid con el acrónimo VOF)

La fracción del fluido en cada celda de la malla se define como α_p . Las ecuaciones de transporte para la mezcla aire-agua son definidas mediante las ecuaciones (12) y (2). El método de volumen de fluido (VOF) localiza la interfase entre el aire y el fluido de trabajo (agua) dependiendo del valor de α_p que varía entre 0 y 1. Basados en un valor local para α_p , las propiedades adecuadas y las variables a cada volumen de control dentro del dominios, se podrá resolver el sistema sin problemas (Delgadillo y Rajamani, 2005).

$$\frac{\partial(\alpha_p)}{\partial t} + \alpha_p \frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (12)$$

2.7. Discretización

La simulación con CFD se realizó en una WorkStation Intel Xeon, X5650 2.67 Ghz, con 12 procesadores en paralelo y licencia académica del ITM. Las ecuaciones se resolvieron numéricamente empleando el software comercial ANSYS FLUENT 18.0 ®, en el cual se utilizó el método de volúmenes finitos para obtener la solución. Se supuso que la altura de llenado del tanque es igual al diámetro del tanque. Para la realización de las simulaciones se definió el modelo de turbulencia RSM mediante validaciones experimentales además del sistema de referencia móvil de mallas deslizantes (Sliding mesh) y para efectos de simulación se supuso un algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) que sirve para el acople de la presión con la velocidad, por lo tanto, permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes. Además, se utiliza la interpolación esquemática de la presión denominada PRESTO para flujos en torbellinos. Para sistemas de segundo se utiliza el Orden Upwind para momentum, presión, energía cinética turbulenta y tasa de disipación turbulenta. Adicional al movimiento de flujo de fluidos se definió un modelo multifásico de Volume of fluid (VOF), para describir la cantidad de fluido que se va a tener en el tanque de agitación separando las mallas y adaptando un nivel en el tanque de esa separación y así definir en las particiones de las mallas cuál corresponde al aire y el agua.

3. Resultados y discusión

En el presente estudio se analiza mediante CFD, un sistema agitado, y al cual se le adicionaron 3 tipos de conos diferentes en el fondo del tanque. Las simulaciones se llevaron a cabo con una turbina Rushton estándar y una turbina de 4 palas inclinadas de 45°. Se analizó el efecto de la potencia sobre el volumen a diferentes números de Reynolds como también el efecto que tiene la turbulencia respecto al consumo de potencia. En los estudios utilizando la simulación mediante CFD, se debe realizar una previa validación de los sistemas que incluye contrastar los resultados obtenidos en la simulación (proceso de validación) con los obtenidos en la experimentación (Wu y Patterson, 1989). Esta validación se realizó mediante dos enfoques, el primer enfoque consiste en comprobar la velocidad radial del impulsor tipo Rushton y el otro enfoque mediante el cálculo y análisis de los números de potencia y bombeo. Para la estimación de estos números se realiza un estudio de malla, y la evaluación de los modelos de turbulencia ($k-\epsilon$ y RSM) junto con el sistema de referencia móvil. Para estas simulaciones se evaluaron 3 tipos de malla tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del mallado.

Tipo de Malla 1		Tipo de Malla 2		Tipo de Malla 3	
# Elementos	380.134	# Elementos	227.737	# Elementos	267.847
# Nodos	239.457	# Nodos	367.478	# Nodos	480.115
Calidad de la malla		Calidad de la malla		Calidad de la malla	
Skewness	0,897	Skewness	0,834	Skewness	0,845
Relación de Aspecto	4,739	Relación de Aspecto	4.150,4	Relación de Aspecto	3,633
Ortogonalidad	0,198	Ortogonalidad	0,240	Ortogonalidad	0,198
Calidad de Elemento	0,124	Calidad de Elemento	0,239	Calidad de Elemento	0,225

3.1. Validación

En el proceso de validación se utilizó diferentes mallas. Se evaluaron los modelos de turbulencia para cada malla y al mismo tiempo los sistemas de referencia móvil. Al evaluar los modelos de turbulencia, el RSM describe de una manera apropiada los resultados experimentales con desviaciones menores al 4 %. Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 3.

Se realiza la validación del número de potencia (N_p) y el número de bombeo (N_Q). Los resultados muestran que para un impulsor Rushton, el número de potencia varía entre 3.47 y 4.59 con un valor promedio de 4.0. En la Tabla 3 se muestra los valores obtenidos de N_p y N_Q para las mallas 1 y 2 evaluadas en este estudio. Por otro lado, en la Tabla 4 se muestra los valores de la malla 3, debido a que esta malla muestra los valores más cercanos a los datos experimentales con desviaciones para RSM Sliding Mesh (sistema de referencia móvil) y κ - ϵ Sliding Mesh inferiores del 4.35 %. No obstante, para los demás enfoques de simulación relacionados con RSM Frame Motion y k-e Frame Motion presentan porcentajes de desviación absolutos superiores de 29.28 %, y por lo tanto se infiere que no son modelos apropiados para utilizar en procesos de tanques de mezcla. Para el número de bombeo la literatura reporta valores de 0.73 para velocidades de rotación entre 100 y 350 rpm (Lane y Koh, 1997; Paul, Atiemo-Obeng y Kresta, 2004) y el valor de la simulación fue de 0.75, por lo que el porcentaje de error relativo (% Error) es del 2.74 %.

Figura 3. Velocidad radial evaluada a diferentes radios para en un impulsor tipo Rushton. Los puntos corresponden a datos experimentales y las líneas a valores obtenidos en la simulación.

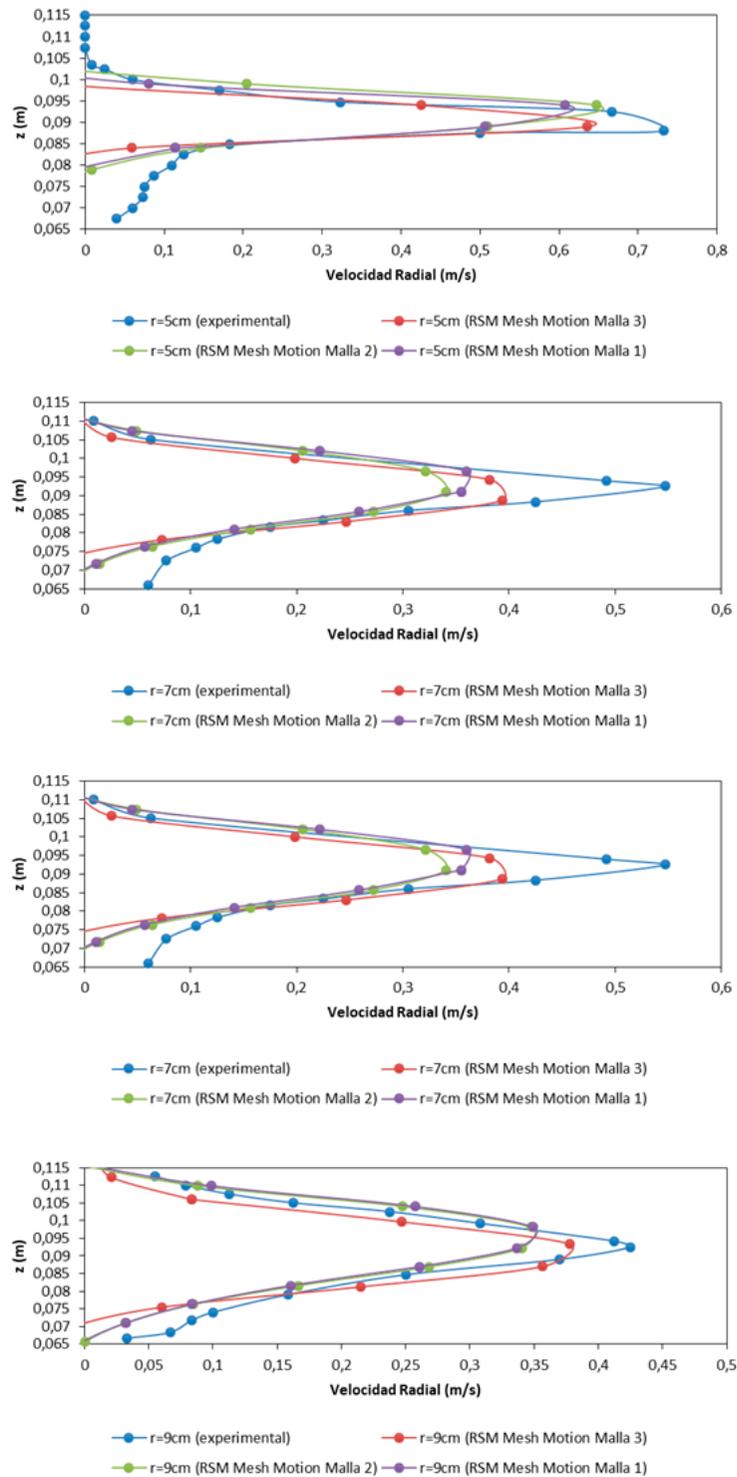


Tabla 3. Número de Potencia de las mallas 1 y 2.

	Malla 1				Malla 2			
	N_Q	N_P	% Error N_Q	% Error N_P	N_Q	N_P	% Error N_Q	% Error N_P
RSM Sliding Mesh	0,69	4,56	5,42%	2,47%	0,66	4,59	11,03%	1,78%
k-e Sliding Mesh	0,65	4,34	11,68%	7,65%	0,73	4,41	0,15%	5,79%
RSM Frame Motion	0,58	3,59	24,87%	30,12%	0,55	3,52	33,12%	32,61%
k-e Frame Motion	0,58	3,47	25,83%	34,71%	0,54	3,48	34,40%	34,37%

Tabla 4. Número de Potencia de la malla 3.

	Malla 3			
	N_Q	N_P	% Error N_Q	% Error N_P
RSM Sliding Mesh	0,75	4,68	2,86	0,17
k-e Sliding Mesh	0,73	4,48	0,15	4,35
RSM Frame Motion	0,53	3,61	38,96	29,28
k-e Frame Motion	0,54	3,59	36,14	30,15

Para validar el número de bombeo y el número de potencia se debe cumplir con unas especificaciones del tanque en donde debe existir una proporción entre el diámetro del impulsor y el diámetro del tanque. Para este estudio, la proporción es de un tercio, y tener cuatro deflectores cuyo ancho es un décimo del diámetro del tanque, colocados cada 90° en la circunferencia del tanque y los cuales se usan para realizar un corte al flujo. Paul, Atiemo-Obeng y Kresta (2004) reportan un valor del número de potencia de 1.27 y del número de bombeo tiene un valor de 0.79 para una turbina Rushton estándar, mientras que los valores suministrados en la simulación del número de potencia y bombeo son de 1.23 y 0.82. Lo anterior implica que las desviaciones absolutas comparativas entre ambos trabajos son menores al 4 %.

3.2. Patrones de flujo y regímenes de transición

En este trabajo se analiza los patrones de flujo junto con los regímenes de transición en los sistemas agitados y la influencia del número de Reynolds en la eficiencia de agitación y el ahorro energético. Los patrones de flujo en un sistema de agitación con deflectores muestran que con número de Reynolds hasta los 43000 no hay una variación significativa en la agitación desde el punto de vista cualitativo cuando se observa los patrones de flujo de la fracción volumétrica de aire. No obstante, cuando el número de Reynolds llega a valores cercanos a los 86000, se muestra un desorden en fluido de trabajo donde la velocidad tangencial adquiere valores elevados por lo que la eficiencia del sistema disminuye. Los comportamientos antes descritos se ilustran en las Figuras 4 y 5. Por otro lado, estos fenómenos ocurren para los sistemas de agitación con cada impulsor, cada tipo de cono y para el fondo plano.

Figura 4. Patrones de flujo para impulsor tipo Rushton estándar para el cono 1. Imágenes superiores muestran un número de Reynolds de 28743. Las imágenes inferiores ilustran un número de Reynolds de 86231.

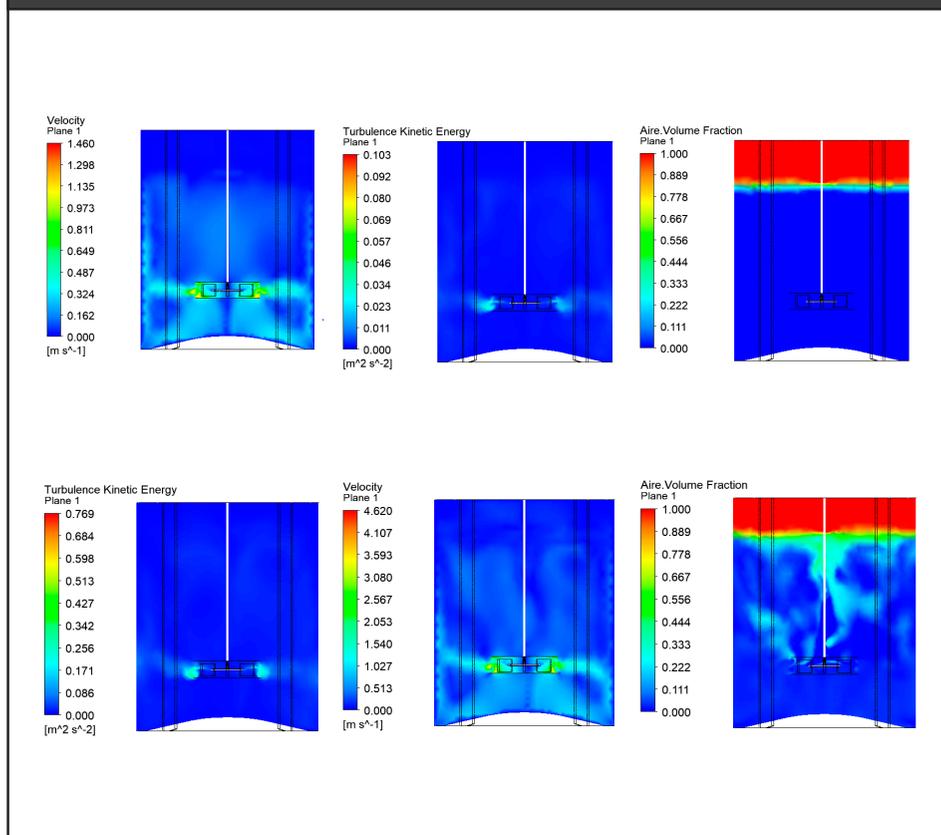
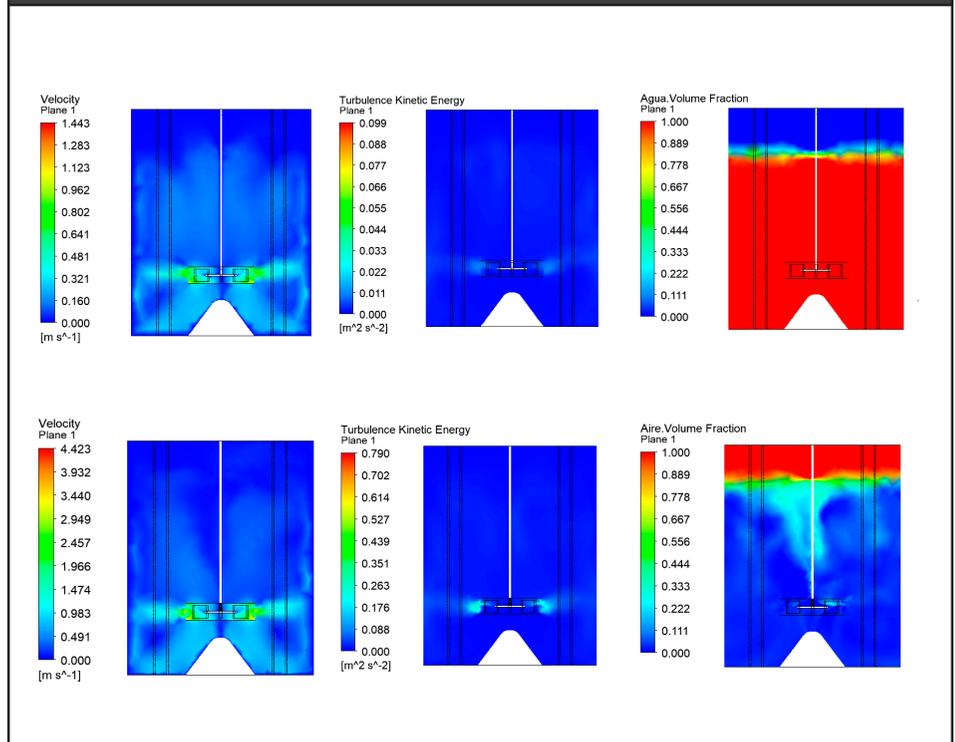


Figura 5. Patrones de flujo para el impulsor tipo Rushton estándar para el cono 2. Imágenes superiores muestran un número de Reynolds de 28743. Las imágenes inferiores ilustran un número de Reynolds de 86231.

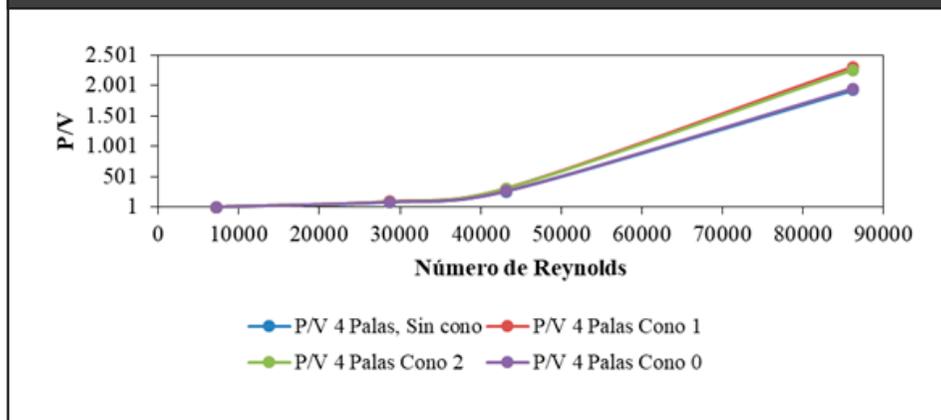


Por otro lado, se realiza el análisis del consumo de potencia mediante una relación Potencia-Volumen para cada impulsor respecto al número de Reynolds. En la Tabla 5 se muestra los valores de la relación P/V, para cada uno sistemas agitados con los diferentes conos empleando el impulsor tipo Rushton estándar. Además, en la Figura 6 se ilustran los respectivos resultados. Al incrementar el número de Reynolds se tiene un incremento del tipo exponencial de la potencia-volumen de cada impulsor. Estos resultados son similares para todas las velocidades de giro analizadas.

Tabla 5. Resultados de P/V (W/m³) para sistemas agitados con turbina Rushton estándar.

Velocidad de giro (rpm)	Sin cono	Cono 0	Cono 1	Cono 2	N _{Re}
50	1,09	1.18	1.15	1.13	7185.94
200	77,04	84,57	89,51	87,92	28.743.77
300	258,06	258,88	305,33	301,31	43.115.65
600	1.921,55	1.949,20	2299,22	2.254,70	86.231.31

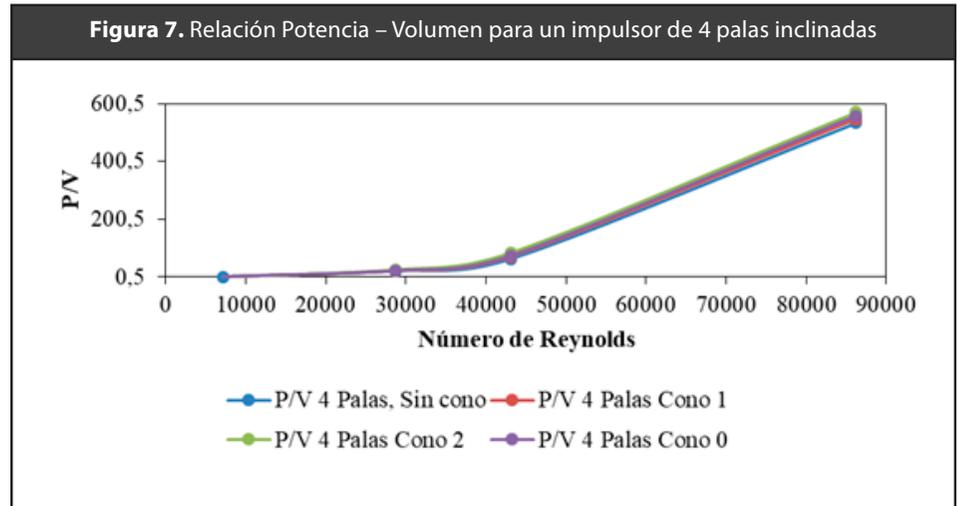
Figura 6. Relación Potencia – Volumen para un impulsor tipo Rushton.



Para el impulsor tipo Rushton se evidencia que, al introducir un cono o una variable geométrica en el fondo, afecta energéticamente en el proceso independiente del régimen (transición o turbulento), por lo que este tipo de impulsor no es efectivo para suspensiones de sólidos. En la Tabla 6 se muestra los valores de la relación P/V, para cada uno sistemas agitados con los diferentes conos empleando el impulsor de 4 palas inclinadas a 45° y en la Figura 7 se ilustra los respectivos resultados. A diferencia del impulsor tipo Rushton estándar, el impulsor de 4 palas inclinadas muestra que para un régimen entre laminar y transición hay un ahorro significativo en el consumo de potencia y para regímenes turbulentos la inclusión de geometrías en el fondo del tanque afecta en el consumo de potencia por lo que no es eficiente el uso de éstas bajo esas condiciones.

Tabla 6. Resultados de P/V (W/m³) para sistemas agitados con turbina de 4 Palas inclinadas a 45°.

Velocidad de giro (rpm)	Sin cono	Cono 0	Cono 1	Cono 2	N _{Re}
50	0,52	0,48	0,41	0,40	7.185,94
200	20,71	22,04	21,43	24,82	28.743,77
300	62,76	73,86	71,06	83,71	43.115,65
600	533,97	557,63	547,12	570,81	86.231,31



4. Conclusiones

Conforme a los resultados presentados en este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. La inclusión de geometrías en el fondo del tanque es eficiente y generan ahorros energéticos para impulsor de tipo axial en regímenes que sean entre laminar y transición por lo que sería útil emplearlo para suspensiones de sólidos de altas concentraciones o fluidos con viscosidad media.
2. La inclusión del cono que más ahorro energético genera es el cono 1 y 2 con 0.41 y 0.40 W respectivamente, respecto a 0.52 W de un sistema agitado con fondo plano. Es importante aclarar que el volumen de trabajo para el sistema agitado sin inclusión de conos es de 15.29 L, y la pérdida de volumen por los conos es de 2.63% para el cono 1 y del 1.13% para el cono 2, esto significa que si se realiza un proceso de escalado para llevar el sistema agitado a una escala piloto o industrial el ahorro sería más significativo.
3. Desde los resultados de la mecánica de fluidos computacionales muestran que la inclusión de los conos en régimen turbulento genera un aumento en la velocidad tangencial por lo que trabajar en estos puntos no es eficiente para este tipo de procesos.
4. Para futuros trabajos se recomienda emplear un fondo en las esquinas más ovalado y encontrar la velocidad de rotación mínima adecuada para una suspensión de sólidos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) y al Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) por el apoyo prestado en el desarrollo de esta investigación.

Nomenclatura

<i>Abreviaciones</i>	
C_{e1}	RNG (k-e) Constante del modelo.
C_{e2}	RNG (k-e) Constante del modelo
C_{e3}	RNG (k-e) Constante del modelo.
C_m	RNG (k-e) Constante del modelo.
D	Diámetro del impulsor (cm)
D_{ij}	Difusión turbulenta
G_{ij}	Producción de empuje
g_i	Gravedad (m/s^2)
M_t	Número de Mach
N	Velocidad de rotación (rpm)
N_p	Número de Potencia
N_Q	Número de Bombeo
P	Potencia (W)
P_{ij}	Producción de tensión
Re	Número de Reynolds
T	Diámetro del tanque (cm)
T	Tiempo (s)
$u_{i,j,k}$	Velocidad del fluido (m/s)
$u_{i,j,k}$	Componente de fluctuación de velocidad
<i>Letras griegas</i>	
a_k	RNG (k-e) Constante del modelo.
b	RNG (k-e) Constante del modelo
e_{ij}	Término de disipación turbulenta
e	Tasa de disipación viscosa
q	RNG (k-e) Constante del modelo
m_t	Viscosidad Turbulenta.
m	Viscosidad absoluta (Pa.s)
r	Densidad del fluido (kg/m^3)
T	torque ($N\cdot m$)
F_{ij}	Término de presión

6. Referencias

- ANSYS. (2009a). Reynolds stress model [Online]. <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/th/node79.htm> (Accessed: 20 May 2022)
- ANSYS. (2009b). Standard k- ϵ - Model. [Online]. <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/th/node58.htm> (Accessed: 20 May 2022)
- Chudacek, M. W. (1985). Suspension in profiled mixing. *Chemical Engineering Science*, 40(3), pp. 385–392 [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(85\)85100-9](https://doi.org/10.1016/0009-2509(85)85100-9)
- Coroneo, M.; Montante, G.; Paglianti, A.; Magelli, F. (2011). CFD prediction of fluid flow and mixing in stirred tanks: Numerical issues about the RANS simulations. *Computers and Chemical Engineering*, 35(10), pp. 1959–1968 <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.12.007>
- Daubert, T. E. (1998). Evaluated equation forms for correlating thermodynamic and transport properties with temperature. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 37(8), pp. 3260–3267 <https://doi.org/10.1021/ie9708687>
- Delgadillo, J. A.; Rajamani, R. K. (2005). A comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem. *International Journal of Mineral Processing*, 77(4), pp. 217–230 <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2005.06.007>
- Dong, J.; Hu, B.; W Pacek, A.; Yang, X.; Miles, N. (2016). The Effect of Bottom Shape and Baffle Length on the Flow in Stirred Tanks in Turbulent and Transitional Flow. *International Academy of Mechanical and Mechatronic Engineering*, 10(9), pp. 1644–1653 <https://doi.org/10.5281/zenodo.1126537>
- Guha, D.; Ramachandran, P. A.; Dudukovic, M. P.; Derksen, J. J. (2008). Evaluation of Large Eddy Simulation and Euler-Euler CFD for Solids Flow Dynamics in a Stirred Tank Reactor. *American Institute of Chemical Engineers AIChE*, 54(3), pp. 766–788 <https://doi.org/10.1002/aic.11417>
- Joshi, J. B.; Nere, N. K.; Rane, C. V.; Murthy, B. N.; Mathpati, C. S.; Patwardhan, A. W.; Ranade, V. V. (2011a). CFD simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models. Part I: Radial flow impellers. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(1), pp. 23–82 <https://doi.org/10.1002/cjce.20446>
- Joshi, J. B.; Nere, N. K.; Rane, C. V.; Murthy, B. N.; Mathpati, C. S.; Patwardhan, A. W.; Ranade, V. V. (2011b). CFD simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models (Part II: Axial flow impellers, multiple impellers and multiphase dispersions). *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(4), pp. 754–816 <https://doi.org/10.1002/cjce.20465>
- Lane, G. L.; Koh, P. T. L. (1997). CFD Simulation of a Rushton Turbine in a Baffled Tank, *International Conference on Computational Fluid Dynamics in Mineral & Metal Processing and Power Generation*. Clayton South, Victoria, Australia, pp. 377–386. https://www.cfd.com.au/cfd_conf97/papers/lan035.pdf
- Li, L.; Chen, N.; Xiang, K.; Xiang, B. (2018). CFD simulation of hydrodynamics characteristics in a tank stirred by a hollow self-inducing impeller. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 96(8), pp. 1–12 <https://doi.org/10.1002/cjce.23135>
- Martínez, F. M.; Valencia, A. (2010). Estudio numérico de la fluidodinámica de un estanque de agitación utilizando método de mallas deslizantes (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil), Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Mecánica, Chile, p. 90. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103931>
- McCabe, W. L.; Smith, J. C.; Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias En Ingeniería Química*. McGraw Hill, pp. 260–281.
- Micale, G.; Montante, G.; Grisafi, F.; Brucato, A.; Godfrey, J. (2000). CFD Simulation of Particle Distribution in Stirred Vessels. *Chemical Engineering Research and Design*, 78(3), pp. 435–444 <https://doi.org/10.1205/026387600527338>
- Montante, G.; Lee, K. C.; Brucato, A.; Yianneskis, M. (2001). Numerical simulations of the dependency of flow pattern on impeller clearance in stirred vessels. *Chemical Engineering Science*, 56(12), pp. 3751–3770 [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00089-6)

- Motamedvaziri, S.; Armenante, P. M. (2012). Flow regimes and surface air entrainment in partially filled stirred vessels for different fill ratios. *Chemical Engineering Science*, 81, pp. 231–250 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.05.050>
- Naeeni, S. K.; Pakzad, L. (2019). Droplet size distribution and mixing hydrodynamics in a liquid–liquid stirred tank by CFD modeling. *International Journal of Multiphase Flow*, 120, p. 103100 <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103100>
- Ochieng, A., & Onyango, M. S. (2008). Homogenization energy in a stirred tank. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(9-10), pp. 1853-1860. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.10.014>
- Ochieng, A.; Onyango, M. S.; Kumar, A.; Kiriamiti, K.; Musonge, P. (2008). Mixing in a tank stirred by a Rushton turbine at a low clearance. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(5), pp. 842-851 <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.01.034>
- Paul, E. L.; Atiemo-Obeng, V. A.; Kresta, S. M. (2004). *Handbook of industrial mixing*, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., pp. 359-375.
- Pukkella, A. K.; Vysyaraju, R.; Tammishetti, V.; Rai, B.; Subramanian, S. (2019). Improved mixing of solid suspensions in stirred tanks with interface baffles: CFD simulation and experimental validation. *Chemical Engineering Journal*, 358, pp. 621–633 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.020>
- Sheikhi, N.; Najafi, M.; Enjilela, V. (2020). Modifying a meshless method to solving κ - ϵ turbulent natural convection heat transfer. *International Journal of Modern Physics C*, 31(01), p. 2050014 <https://doi.org/10.1142/S012918312050014X>
- Versteeg, H. K.; Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The volume finite method* (1st ed.), London, Pearson education, pp. 1-40.
- Wu, H.; Patterson, G. K. (1989). Laser-Doppler measurements of turbulent-flow parameters in a stirred mixer. *Chemical Engineering Science*, 44(10), pp. 2207–2221 [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(89\)85155-3](https://doi.org/10.1016/0009-2509(89)85155-3)
- Wutz, J.; Waterkotte, B.; Heitmann, K.; Wucherpfennig, T. (2020). Computational fluid dynamics (CFD) as a tool for industrial UF/DF tank optimization. *Biochemical Engineering Journal*, 160, p. 107617 <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107617>