



Análisis Numérico De La Hidrodinámica En Tanques Agitados A Través De Implementar Una Turbina Rushton

Víctor Manuel Hernández-Montecillo¹, J. Luis Luviano-Ortiz¹, Abel Hernández-Guerrero³

¹Licenciatura en Ingeniería Mecánica | Dirección de correo electrónico:
vm.hernandezmontecillo@ugto.mx

²Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingeniería Campus Irapuato -
Salamanca, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico:
luis.luviano@ugto.mx

³Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingeniería Campus Irapuato -
Salamanca, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico:
abel@ugto.mx

Resumen

En los últimos años, las investigaciones relacionadas con la agitación y mezclado de fluidos en tanques agitados han estado dirigidas hacia la caracterización de la turbulencia y al impacto de ésta sobre los resultados de los procesos. De esta forma, se ha encontrado que las variables que dependen de la energía turbulenta han sido relacionadas con el daño a las células, la dispersión de gas, el tiempo de agitación y mezclado, la ruptura de gotas, la cristalización y la floculación y coagulación. Debido a lo anterior, existe una gran área de oportunidad de investigación básica y aplicada, relacionada con los tanques agitados de la cual podrían surgir diseños alternativos, más eficientes económicamente para los diferentes procesos a introducir en la industria, partiendo del conocimiento básico de la hidrodinámica y la transferencia de masa en los sistemas de agitación [1]. En base a lo anterior, en este proyecto se estudian las características de la agitación del análisis numérico de un tanque agitado a través de la implementación de una turbina Rushton convencional en un tanque agitado sin placas deflectoras, el estudio se centra en el análisis hidrodinámico estructural que desarrolla un fluido newtoniano al ser agitado con un régimen de flujo laminar, con un número de



Reynolds laminar de $Re=8.6$. Para el análisis de lo anterior, se usó el método de Elemento Finito en Software comercial y se hizo uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Los resultados (mostrados mediante gráficas, mapas de velocidad y posición de las partículas) muestran que la agitación está gobernada principalmente por fenómenos de difusión más que por fenómenos convectivos.

Abstract

In recent years, research related to the agitation and mixing of fluids in agitated tanks has been directed towards the characterization of turbulence and its impact on process results. In This way, it has been found that variables that depend on turbulent energy have been related to cell damage, gas dispersion, agitation and mixing time, droplet rupture, crystallization, flocculation and coagulation. Due to this, there is a large area of basic and applied research opportunity, related to agitated tanks from which alternative, more economically efficient designs could emerge for the different processes to be introduced into the industry, based on basic knowledge of hydrodynamics and mass transfer in agitation systems [1]. Based on the above, this project, the characteristics of agitation of a numerical analysis on a stirred tank through the implementation of a conventional Rushton turbine are studied in a stirred tank without deflector plates, therefore, the study focuses on the structural hydrodynamic analysis developed by a Newtonian fluid when it is agitated within a laminar flow regime with a Reynolds number equal to $Re = 8.6$. For the analysis of the above, the Finite Element Method was used through commercial software of computational fluid dynamics (CFD). The results (shown by graphs, velocity maps and particles position) show that agitation is governed mainly by diffusion phenomena rather than by convective phenomena.

Objetivos

Los objetivos principales de este trabajo son estudiar y analizar el comportamiento hidrodinámico de la agitación cuando el fluido es estimulado por medio de una turbina Rushton convencional, así como lograr la agitación completa en el menor



tiempo posible bajo el régimen de flujo laminar y, mostrar los efectos de vorticidad en el tanque agitado.

Introducción

El prototipo para el análisis de la agitación está constituido principalmente de un tanque agitador (en donde se vierte y se confina el fluido a analizar) y una turbina Rushton, la cual se posiciona de acuerdo con las semejanzas geométricas de los tipos de impulsores más utilizados en la industria. Para el análisis, se diseñó en CAD el tanque agitador, así como la turbina. Las ecuaciones gobernantes de conservación de masa, así como de Navier-Stokes se resolvieron a través del método de Elemento Finito por medio de un software comercial especializado para CFD.

Debido a que la agitación está gobernada por una gran cantidad de variables las cuales afectan y determinan las necesidades y objetivos particulares de las características de agitación que se desean, entre las que se encuentran principalmente el diámetro del tanque, diámetro de las palas, altura del fluido, ancho y cantidad de las placas deflectoras y distancia desde el fondo del estanque hasta el impulsor [2], en este estudio se relacionaron las dimensiones entre el tanque agitador con las respectivas del impulsor.

Justificación

El mezclado es un proceso en donde al menos dos sustancias se homogenizan, esto interpreta que ambas sustancias se mezclan entre sí para generar una nueva, con propiedades y estructuras uniformes en todo su dominio. El mezclado está presente en la vida cotidiana y en la industria, en esta última, los procesos pueden llegar a ser largos en tiempo y costosos energéticamente por lo que es importante el aumento de la eficiencia en el mezclado. La forma de acelerar el mezclado es usando la agitación (operación en donde se acelera los procesos de transferencia de calor y de masa) de las sustancias participantes mediante un impulsor o turbina, ésta reduce el tiempo que necesitan las sustancias para unirse. El



impulsor requiere la adición de potencia para originar el movimiento del fluido bajo análisis. Existe una gran variedad de impulsores utilizados que son clasificados por el flujo que inducen en el tanque agitado, los cuales se clasifican como impulsores de flujo axial y de flujo radial.

La importancia de incrementar la eficiencia en un proceso de mezclado es debida a los amplios usos que tiene en la industria alimenticia, la química y la biotecnológica. En términos del impulsor Rushton, se ha utilizado ampliamente en las operaciones químicas, farmacéuticas, bioquímicas y otras en operaciones industriales [4]. Aunado a esto, el uso de tanques agitados en sistemas de cultivo celular requiere bajas velocidades de revolución de manera que las células no mueran debido a un excesivo esfuerzo [6].

Para analizar el comportamiento hidrodinámico de un fluido en tanques agitados existen técnicas científicas, una de ellas es de manera experimental como la realizada por P. MAVROS *et al.* [5], quienes explican algunas de las técnicas para la medición y análisis del comportamiento de un fluido. Su trabajo divide las técnicas en dos partes, la primera *Single-Point Techniques* y la segunda *Ensemble Measurements*, donde la segunda explica una técnica actualmente utilizada en muchas áreas de estudio en dinámica de fluidos, la cual es la velocimetría de Imágenes por Partículas (PIV, por sus siglas en inglés). También predominan tres grupos de modelos para la descripción de la hidrodinámica en tanques agitados [3]. El primer tipo es una combinación de reactores ideales; el segundo está basado en una red de zonas con intercambio entre las celdas y el tercero se basa en la implementación de la dinámica de fluidos computacional CFD.

El mezclado de fluidos no sólo involucra sustancias en estado líquido, sino en combinaciones entre los estados de la materia, como lo son líquido-líquido, líquido-sólido, líquido-gas, dependiendo de la cantidad de sustancias que se involucren en el mezclado se pueden presentar combinaciones como líquido-líquido-gas, líquido-gas-sólido entre otras.



Metodología

El trabajo se analizó mediante una simulación numérica, implementando el método de Elemento Finito por medio de CFD, en donde se resolvió el comportamiento hidrodinámico del flujo tridimensional dentro de los tanques agitados a través de resolver las ecuaciones de Continuidad (Ec. (1)) y de Navier-Stokes (Ec. (2)) en cada una de las celdas en que se dividió el volumen bajo estudio. La descomposición de Reynolds se implementó sobre las ecuaciones no lineales y se completó el sistema de ecuaciones con los modelos de turbulencia [3], aunado a esto, el fluido de trabajo que se utilizó fue glicol [7].

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

En las Ecs. (1) y (2) se consideró la función gradiente en coordenadas cilíndricas, la cual se muestra en la Ec. (3)

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \hat{e}_\theta + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (3)$$

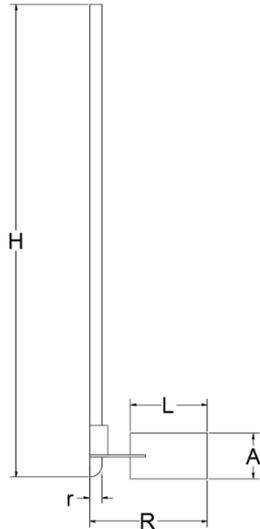
Para las propiedades del fluido, se utilizaron como referencia las proporcionadas por Lamberto *et al.* [7] y se resolvieron las Ecs. (1) – (3) para una velocidad laminar y fluido newtoniano. El número de Reynolds utilizado fue de $Re = 8.6$, el cual está dado por la Ec. (4).

$$Re = \frac{\rho N_{rps} D_i^2}{\mu} \quad (4)$$

donde ρ corresponde a la densidad del fluido, N_{rps} es la velocidad angular de agitación de la turbina, D_i corresponde al diámetro de la turbina y μ es la viscosidad dinámica del fluido, la cual correspondió para una temperatura de 25 °C.



En la ILUSTRACIÓN 1, se muestra la forma representativa y esquemática de las variables geométricas de la turbina Rushton, mientras que en la TABLA 1, se muestran las magnitudes de los parámetros geométricos. Cabe destacar que, para la misma velocidad angular, posición y tamaño global de la turbina, así como condiciones de operación, la condición que más afecta en el comportamiento del fluido es el diseño de la turbina.



ILUSTRACION 1: Diagrama esquemático y principales variables de la turbina Rushton.

TABLA 1: Dimensiones de la turbina Rushton.

Altura de eje impulsor, H	15.3 mm
Radio de eje impulsor, r	3.9 mm
Radio de impulsor, R	38.1 mm
Longitud de paleta, L	25.0 mm
Altura de paleta, A	14.6 mm
Espesor de paleta, W	7.0 mm

La simulación numérica aporta resultados relevantes en el desarrollo de mezclado debido a que permite predecir los tiempos de agitación y mezclado, la potencia necesaria para generar el movimiento del fluido y proseguir al desarrollo de métodos para incrementar la eficiencia de la agitación y/o el mezclado. Cabe señalar que el costo para la creación y maquinaria de montaje para el tanque agitado con el impulsor propuesto puede ser bastante alto, es por lo que una simulación numérica puede proporcionar resultados previos con bastante precisión que se obtendrán con el impulsor propuesto sin hacer gastos mayores antes de la experimentación. Debido a lo anterior, en este proyecto se utilizó un software especializado en simulación numérica, esto debido a sus características, módulos y resultados satisfactorios que se presentan en varios trabajos publicados.



A fin de validar los resultados obtenidos, éstos se compararon con los resultados reportados en el estado del arte referente a agitación y mezclado en tanques agitados, sobre todo aquellos con números de Reynolds laminares y se encontró que el estado del arte reporta que los principales problemas en la agitación y mezclado, tales como la compartición y toroides, siempre existen en ese rango de número de Reynolds, por lo que se hace ineficiente el proceso ya que la agitación y mezclado se debe principalmente a efectos difusivos y no a los cinemáticos. Por lo tanto, una forma de mejorar la agitación es a través de desestabilizar el comportamiento del fluido con la finalidad de generar caos, lo cual a su vez se logra cambiando la geometría de la turbina, cambiando el sentido de la rotación de la turbina o incrementando la velocidad de rotación, sin embargo, estas soluciones generan un incremento de esfuerzos en el eje de la turbina y en la potencia de alimentación y, por ende, un aumento de los costos de mantenimiento y suministro.

La turbina tipo Rushton, que se caracteriza por ser de flujo radial (dirección en la que sale propulsada la partícula), que se aprecia en el mapa vectorial de velocidad de la simulación. En base a lo anterior, se ha establecido un desarrollo para la simulación numérica del proyecto:

1. Búsqueda en el estado del arte sobre simulación numérica de diferentes turbinas en tanques agitados en los que se estudia y analiza la experimentación.
2. Identificación de las geometrías de turbinas más estudiadas para su modelación ya que la selección de estas turbinas será en base al comportamiento del fluido y eficiencias.
3. Modelado de la geometría propuesta en software CAD especializado.
4. Mallado de la geometría propuesta.
5. Simulación numérica en un flujo agitado implementando la geometría propuesta.



6. Análisis y validación de resultados obtenidos en la agitación a través del uso de la geometría propuesta.

Resultados

Para el análisis hidrodinámico de agitación, se consideró una turbina convencional Rushton, implementada por Lambert *et al.* [7] la cual tiene como característica que sus paletas están orientadas a 90° con respecto al plano horizontal (XY).

En la ILUSTRACIÓN 2 se muestran los contornos de velocidad del impulsor, donde se puede apreciar que la tasa de corte mayor se tiene en los extremos de las paletas, esto era de esperarse ya que es el lugar donde la turbina tiene su mayor velocidad.

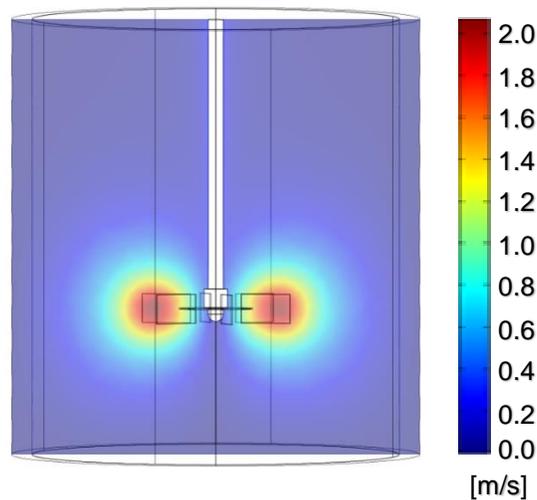


ILUSTRACIÓN 2: Contornos de velocidad del impulsor.

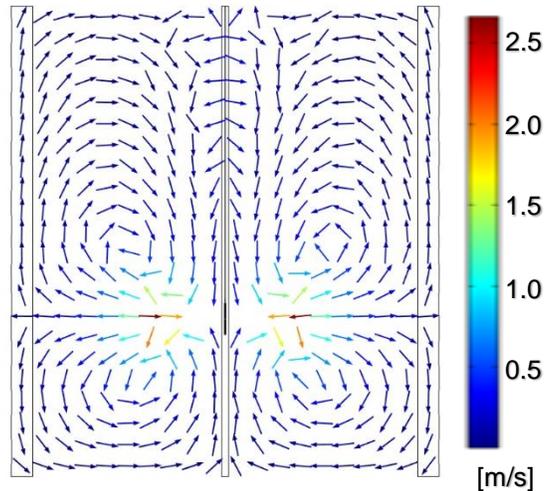


ILUSTRACIÓN 3: Campo vectorial de velocidad.

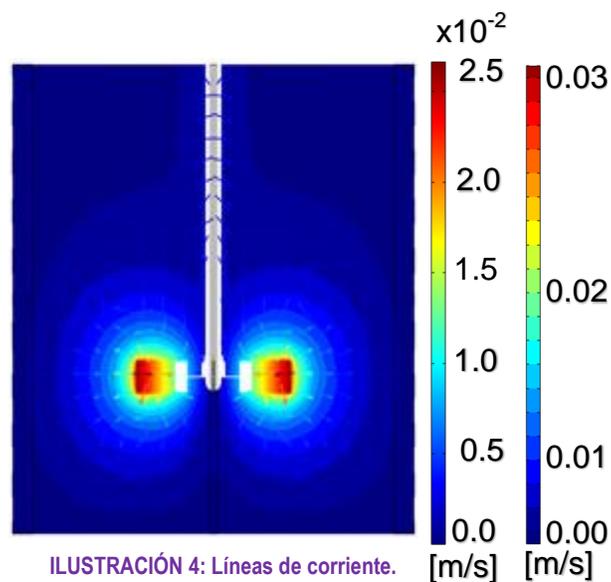
Con la finalidad de comprender el comportamiento hidrodinámico de la agitación generada por la turbina Rushton, en la ILUSTRACIÓN 3 se muestra el campo de vectores de velocidad de la agitación del fluido para el tiempo $t = 900$ s, en esta figura se observa que hay dos vórtices, uno en la parte superior y otro en la parte inferior, puesto que el contenedor es de forma cilíndrica, entonces los vórtices tienen una topología toroidal, cabe señalar que ambos toroides se mantienen constantes con el paso del tiempo, esto es una característica importante de la turbina rushton convencional, ya que se considera de flujo radial, por lo que era de esperarse que se desarrollaran estos tipos de vórtices. La ILUSTRACIÓN 3 muestra además que el principal comportamiento hidrodinámico en la agitación mediante una turbina Rushton es por el efecto de difusión y no por el efecto convectivo, esto, por lo tanto, genera que el tiempo requerido para que se tenga el proceso de agitación y/o mezclado deberá ser grande.

En la ILUSTRACIÓN 3 se observa además que la turbina Rushton impulsa a las partículas, generando que éstas fluyan hacia las paredes del contenedor en donde éstas colisionan, por lo que se generan varios “puntos silla” en los cuales para ciertos instantes las partículas tienden a fluir hacia arriba y en otros tienden a fluir hacia abajo, esto genera, por lo tanto, que las partículas sean incorporadas ya sea al toroide superior o inferior. Cabe señalar que una vez que la turbina Rushton



impulsa a las partículas hacia las paredes del contenedor, se genera una sección inestable ya que estas partículas en este instante pertenecen a ambos toroides pues están en la frontera entre ellos.

En la ILUSTRACIÓN 4 se muestran las líneas de corriente del comportamiento hidrodinámico del fluido, las cuales son generadas por la turbina Rushton, para un tiempo de agitación $t = 900$ s, estas líneas de corriente muestran la trayectoria tangente a las trayectorias de las partículas del fluido. En esta imagen se observa que la propensión que siguen las líneas de corriente tiende a alargarse formando óvalos lo cual se debe a la presencia de los vórtices toroidales.



Conclusiones

En este trabajo se analizó el comportamiento hidrodinámico de la agitación de un fluido generado por medio de una turbina Rushton convencional. Los resultados obtenidos concuerdan con los reportados en el estado del arte, en donde se muestra que se tiene la presencia de dos vórtices tipo toroide, lo cual es característico del fenómeno generado por la turbina Rushton convencional, con las propiedades fueron propuestas por Lamberto *et al.* [7]. Como se mencionó anteriormente, se obtuvieron dos vórtices toroidales lo cual indica que el fenómeno



de mezclado dependerá principalmente por los fenómenos difusivos más que por los convectivos. Por otra parte, al colocar la turbina en posición mostrada, se logró que la agitación fuera en un menor tiempo.

Este proyecto muestra que es importante continuar con la investigación de los tanques agitados en donde se debe buscar obtener una agitación y/o mezclado óptimo, los cuales sean en el menor tiempo posible, de forma laminar y con la menor cantidad de energía suministrada, para ello, se requiere entre otras cosas, proponer nuevas geometrías de impulsores para que generen un mayor caos, además de reducir el consumo energético total del proceso.

Referencias

[1] García-Cortés, D. (2004). Contribución al estudio de la hidrodinámica y la transferencia de masa en reactores tipo tanque agitado mediante un enfoque global y local en sistemas gas-líquido. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*. Vol. 35, No. 2, pp. 111-112.

[2] Castillo-Uribe, V. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería Mecánica. Chile.

[3] García-Cortés, D. y Jáuregui-Haza, U. (2006). Hidrodinámica en tanques agitados con turbinas de disco con paletas planas. *Revista Facultad de Ingeniería*. Vol. 38, pp. 97-113.

[4] Su, T., Yang, F., Li, M., & Wu, K. (2018). Characterization on the hydrodynamics of a covering-plate Rushton impeller. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. Vol. 26, No. 6, pp. 1392-1400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.11.015>.



[5] Mavros, P. (2001). Flow visualization in stirred vessels: A review of experimental techniques. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 79, No. 2, pp. 113-127. DOI: <https://doi.org/10.1205/02638760151095926>.

[6] Bulnes-Abundis, D., Carrillo-Cocom, L. M., Aráiz-Hernández, D., García-Ulloa, A., Granados-Pastor, M., Sánchez-Arreola, P. B. & Alvarez, M. M. (2013). A simple eccentric stirred tank mini-bioreactor: Mixing characterization and mammalian cell culture experiments. *Biotechnology and bioengineering*. Vol. 110, No. 4, pp. 1106-1118. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.24780>.

[7] Lamberto, D. J., Alvarez, M. M., & Muzzio, F. J. (1999). Experimental and computational investigation of the laminar flow structure in a stirred tank. *Chemical Engineering Science*. Vol. 54, No. 7, pp. 919-942. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00275-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00275-9).