**Perturbaciones geométricas en tanques agitados mecánicamente en régimen de flujo laminar.**

**Autor:**

Edgar Efraín Mesino Martínez

**Resumen**

Con el fin de mejorar el rendimiento de mezclado en un recipiente agitado mecánicamente en régimen laminar, con fluidos de diferente reología, se propone una nueva alternativa que consiste en introducir un sistema de perturbación del flujo a dos diferentes excentricidades. Se analizaron diferentes escenarios en los cuales se utilizaron dos tipos de agitadores, una turbina Rushton y una turbina PBT. Utilizando dos fluidos, Fluido 1 (glicerina pura grado USP, con una viscosidad dinámica de 0.9 Pa·s) y Fluido 2 (Carbopol 0.05%, CMC 0.8% y poliacrilamida 0.025%). Los patrones de flujo en el tanque se visualizaron mediante la técnica de Colorimetría (no-intrusivas). Tiempos de mezclado, niveles de homogeneidad y consumo de potencia fueron estudiados. Como resultado, se demostró que el método propuesto en este trabajo tiene una significativa mejora de eficacia de la mezcla a bajos números de Reynolds en fluidos Newtonianos. Este método puede brindar una nueva innovación en sistemas agitados.

**Introducción**

Para alcanzar un mayor grado de homogeneidad, disminuir el tiempo de mezclado y lograr un bajo consumo de energía en el proceso de mezclado, se han propuesto diversas alternativas. Entre las cuales se pueden encontrar: el empleo de agitadores excéntricos, operando simultáneamente y de forma independiente, demostrando que las regiones segregadas son fácilmente destruidas, por medio, de condiciones de geometría asimétrica combinada con perturbaciones dinámicas. Con dos impulsores descentrados, se observó una fuerte influencia de las condiciones de geometría en los tiempos de mezclado, logrando una mejor homogenización [1], la introducción de objetos en un tanque agitado por un impulsor. Concluyendo mediante resultados experimentales que se pueden eliminar las regiones segregadas de la mezcla por encima y por debajo del impulsor, con lo cual el tiempo de mezclado puede ser significativamente reducido, especialmente en el caso de introducir objetos más grandes. La comparación de este método de mezclado espacial con el tiempo temporal dependiente, demostró que el método tiene una ventaja a bajos números de Reynolds [2], aplicando un cambio de velocidad en el impulsor de forma periódica en el proceso de mezclado, encontraron que las zonas segregadas pueden ser destruidas rápidamente al imponer un cambio de velocidad en el impulsor, debido a que algunas fracciones de fluido bien mezclado escapan del interior de las zonas bien mezcladas, causando entrada de fluido sin mezclar y mejorando el nivel de homogeneidad en el interior del tanque agitado. A su vez, las islas formadas durante el mezclado pueden ser eliminadas con estos cambios hidrodinámicos de velocidad [3], utilizando un nuevo arreglo de impulsor, basado en el uso de turbinas Rushton, con la cual se realizaron estudios experimentales con el agitador descentrado, encontrando que este impulsor propuesto, elimino las zonas segregadas en el interior del tanque en régimen laminar, disminuyo el tiempo de mezclado y alcanzo mayores niveles de homogeneidad en el tanque agitado. Este estudio demostró que el mezclado puede ser mejorado al utilizar perturbaciones geométricas basadas en diseños de impulsores que generen mayores diferenciales de presión dentro del tanque de mezclado [4], variar la velocidad de rotación del agitador y el sentido de giro. Concluyeron que el tiempo de mezclado puede ser reducido considerablemente, debido a la gran inestabilidad producida por el cambio de velocidad del impulsor. A su vez, la inducción de mezclado caótico producido por el cambio de giro del agitador genera un rápido incremento en el nivel de homogeneidad, obteniéndose una mejora significativa en el proceso de mezclado [5].

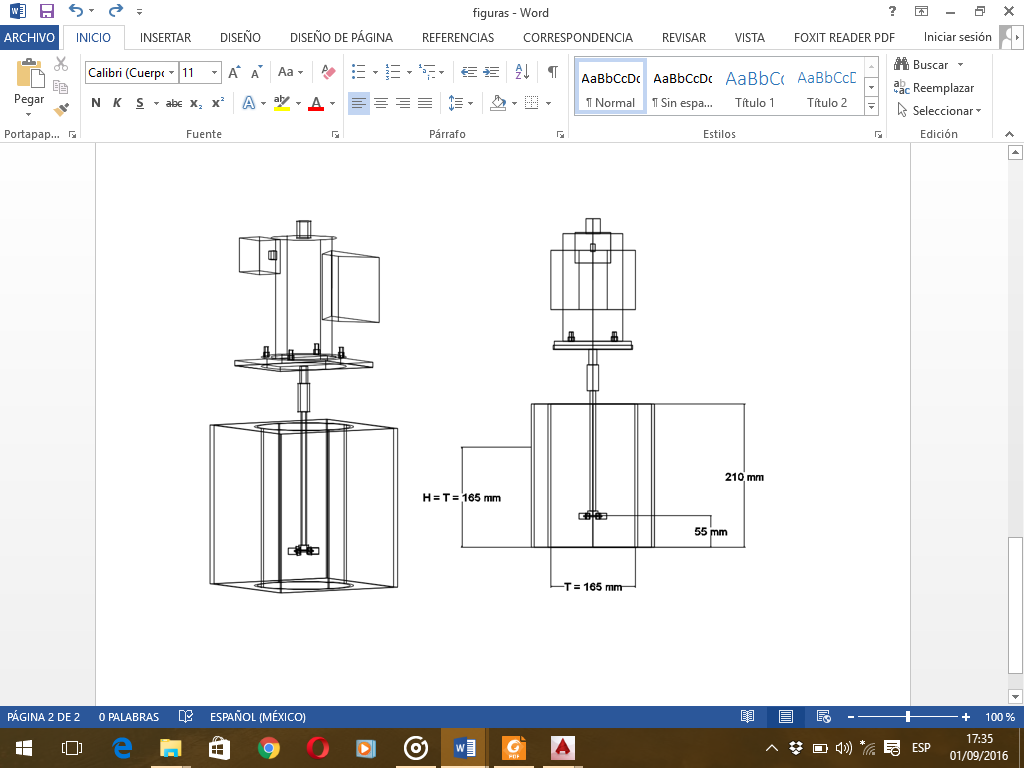
Otras alternativas propuestas, demostraron en un estudio teórico de que la mezcla podría mejorarse si el flujo es perturbado de forma continua, evitando la formación de regiones segregadas cercas del impulsor [6]. Estos resultados fueron más tarde confirmados utilizando cilindros concéntricos girando en ambas direcciones durante tiempos cortos [7, 8, 9, 10].

Estas estrategias para mejorar el proceso de mezclado, han sido la principal expectación para realizar este estudio con perturbaciones geométricas en el proceso de mezclado en régimen laminar. Pretendiendo contribuir, en las industrias que emplean ampliamente este proceso donde destacan aquellas que manejan materiales altamente viscosos y de reología compleja. Proponiendo así una nueva alternativa que consiste en introducir un sistema de perturbación cuyo principal objetivo es obtener un mayor nivel de homogeneidad y calidad del producto final en el tanque de agitación, en un menor tiempo de mezclado y reduciendo de esta manera el consumo de energía.

**Materiales y Métodos**

*Sistema de mezclado.*

El sistema experimental utilizado durante este trabajo, se muestra en la figura 1, y está compuesto de un tanque cilíndrico transparente de policarbonato de un diámetro interior (T) igual a 165 mm y 210 mm de altura, una altura del fluido (H) igual al diámetro interior del tanque (T = H). Se empleó una camisa cuadrada conteniendo el mismo fluido sujeto a estudio, cuyo principal objetivo es evitar los cambios significativos en el índice de refracción y disminuir la distorsión óptica generada por la curvatura del tanque.

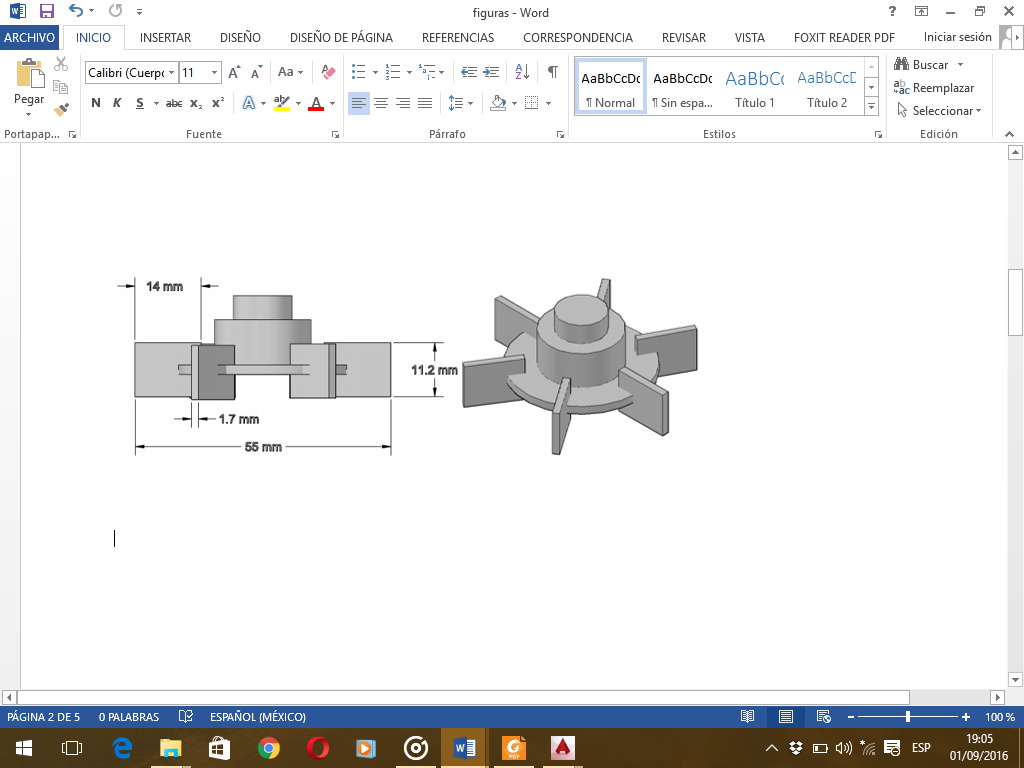


**Figura 1**. Montaje experimental y dimensiones del sistema de mezclado.

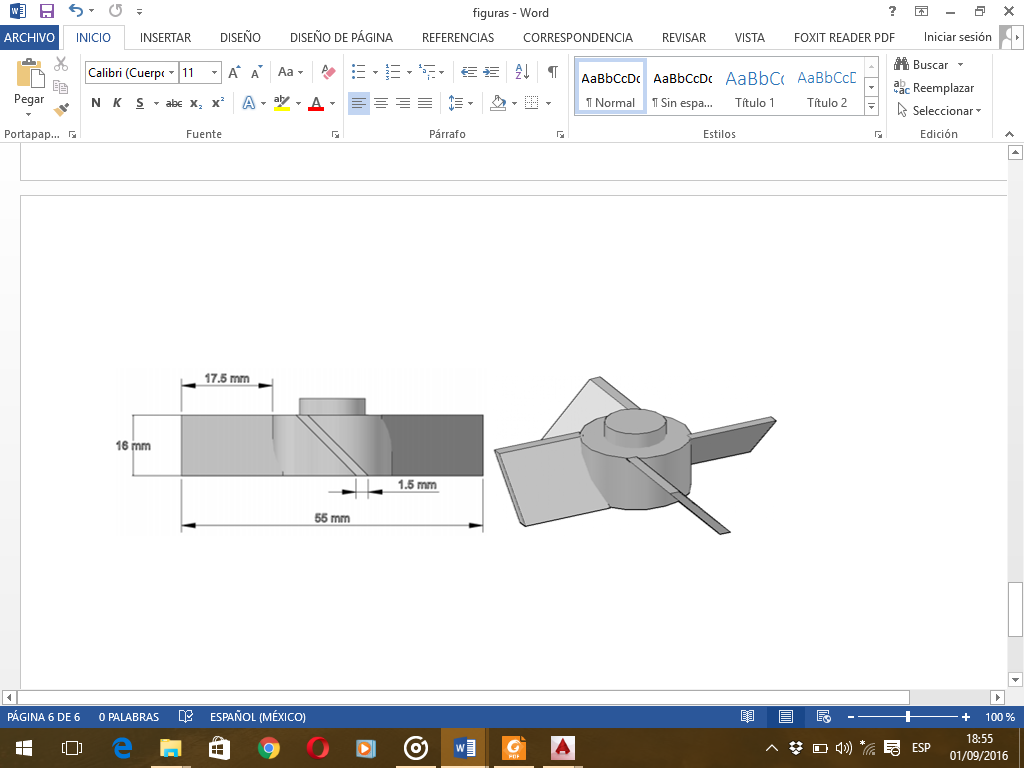
En este trabajo se utilizaron dos tipos de impulsores a tres velocidades de rotación, 60 rpm (N = 1 s-1), 120 rpm (N = 2 s-1) y 180 rpm (N = 3 s-1). La velocidad de rotación se midió por medio de un tacómetro digital. Los impulsores se montaron sobre una misma flecha en el centro del tanque conectado a un motor de CD marca Baldor, con controlador de velocidad.

Los dos impulsores estudiados presentan un diámetro, D = 55 mm. Estos se describen a continuación:

1. Un impulsor de turbina de disco Rushton compuesta por seis palas rectas, como el que se muestra en la figura 2, la cual produce un flujo radial.
2. Una turbina de paletas inclinadas planas (*pitched blade turbine PBT*) con un ángulo de inclinación de 45°, mostrada en la figura 3., la cual genera un flujo combinado radial-axial.

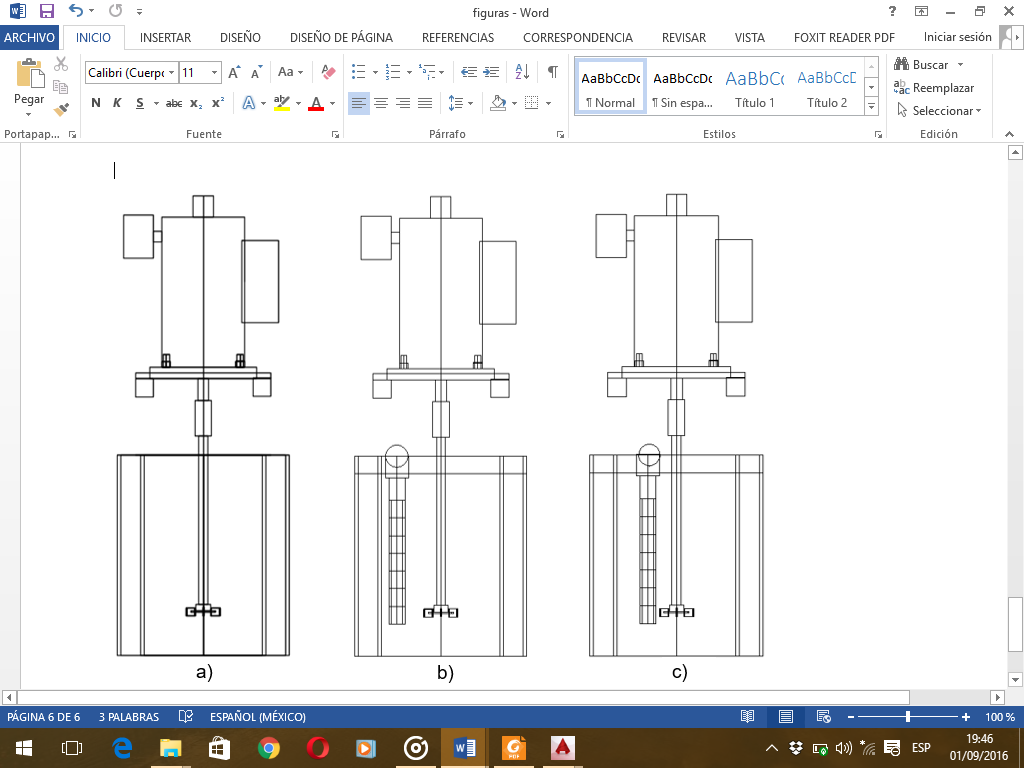


# **Figura 2.** Dimensiones de turbina de disco Rushton.



# **Figura 3.** Dimensiones de turbina PBT.

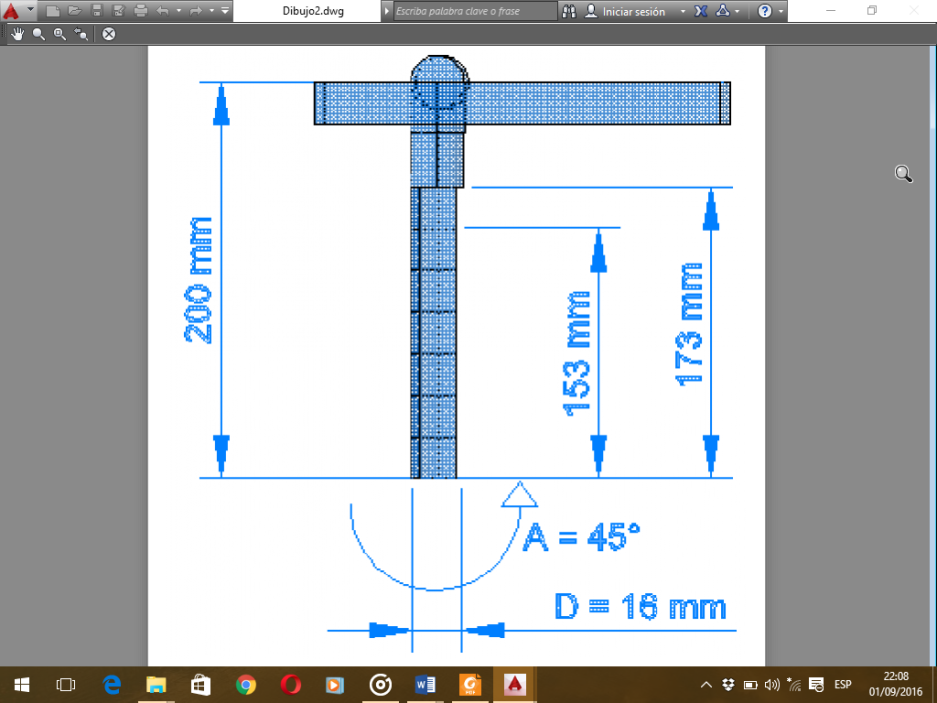
Tres condiciones de operación se estudiaron, la primera utilizando el impulsor sin ningún tipo de perturbación en el flujo generado por el impulsor, el segundo introduciendo una perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.33 (ẋ = x/T*)*, donde *x* = es la distancia del centro del tanque al centro de la perturbación (55 mm) y *T* es el radio del tanque de mezclado (165 mm). Posteriormente la tercera configuración fue colocando la misma perturbación pero a una excentricidad de ẋ = 0.25 donde x = 41 mm (figura 4). Utilizando dos distintos fluidos, (fluido 1) glicerina pura (grado USP) con una viscosidad dinámica de 0.9 Pa·s y densidad de 1250 kg/m3 y una solución (fluido 2) de (Carbopol 0.05%, CMC 0.8% y poliacrilamida 0.025%) a la cual se le realizo una prueba reológica para determinar su viscosidad. En total se realizaron 36 escenarios de acuerdo a la ecuación 1.



**Figura 4.** Modelos experimentales: a) sin sistema de perturbación, b) con sistema de perturbación a ẋ = 0.33, c) a ẋ = 0.25.

*Bases de diseño de la perturbación geométrica*

El sistema de perturbación propuesto consta de un tubo de cobre de diámetro interior de 16 mm y de 200 mm de longitud al cual fue cortado transversalmente hasta una altura de 173 mm, con una altura de inmersión en el fluido de 153 mm, teniendo con esto una área de contacto de 76.4 cm2, las medidas se basaron a las medidas del tanque de agitación, dicha perturbación se colocó a un ángulo de 45° con respecto a su horizontal (figura 5). Este sistema de perturbación se utilizó en dos diferentes excentricidades (ẋ = 0.25 y ẋ = 0.33); ẋ = x/T, donde *x* = es la distancia del centro del tanque al centro de la perturbación (55 mm) y *T* es el radio del tanque de mezclado (165 mm).



**Figura 5.** Dimensiones y diagrama físico del sistema de perturbación.

*Método de visualización*

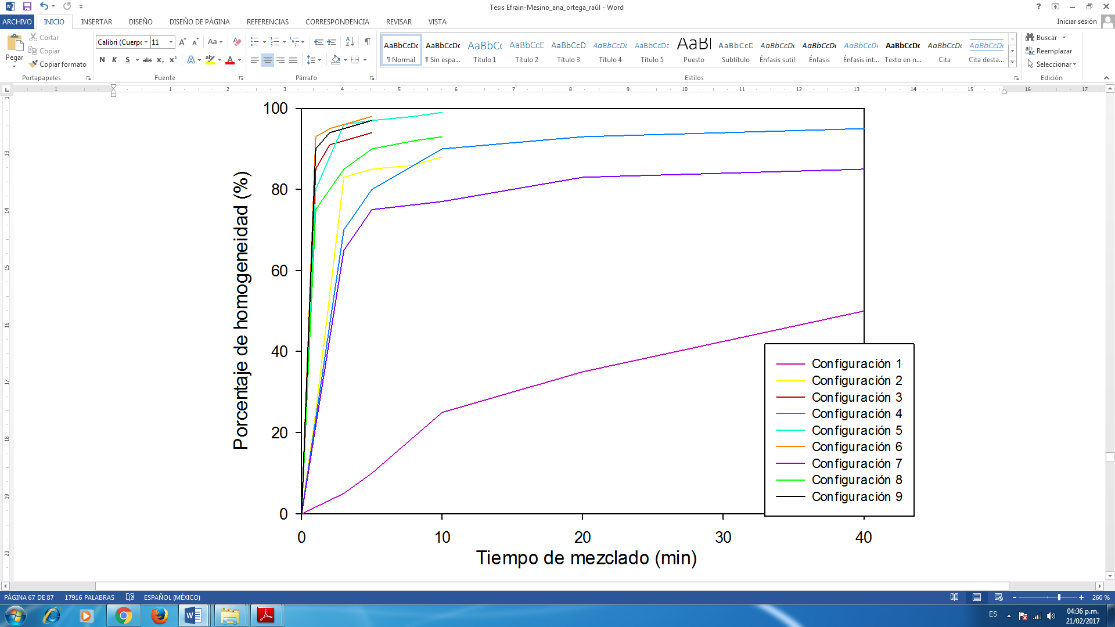
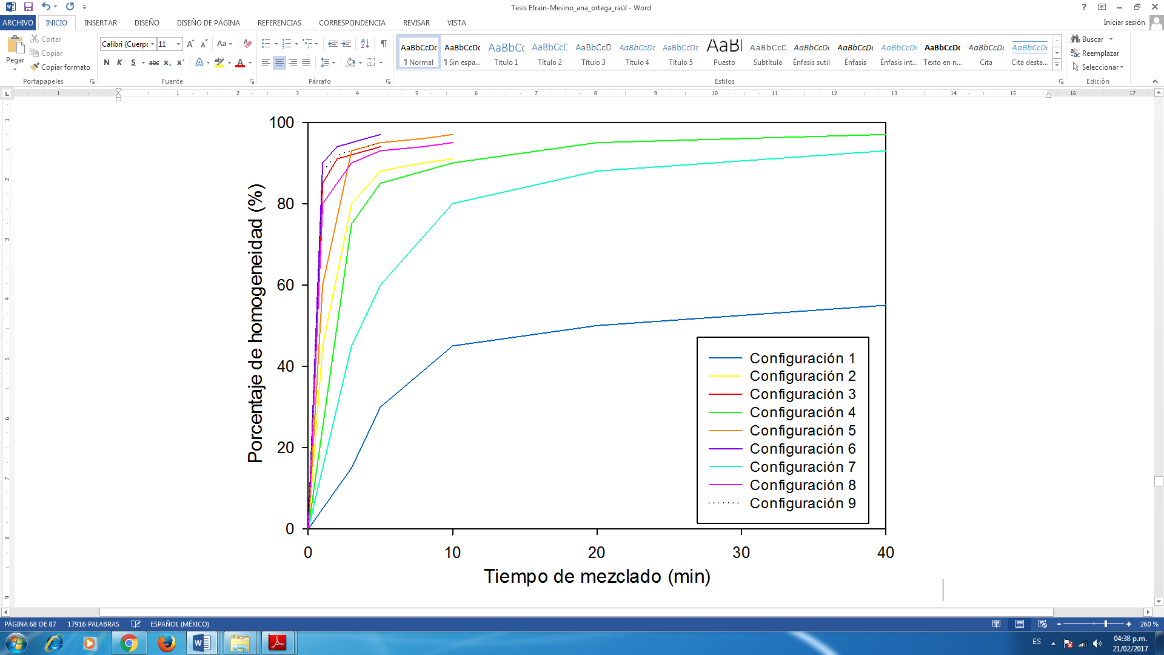
Para investigar el patrón de mezclado y el tiempo de mezclado, se utilizó el método de colorimetría. En ella, se lleva a cabo una reacción ácido-base, la cual genera cambios de color en el fluido de estudio. En cada uno los experimentos se tomaron fotos a intervalos constantes de tiempo, para posteriormente analizar las imágenes con el fin de establecer objetivamente el tiempo de mezclado. En todos los escenarios estudiados, las condiciones de operación fueron las mismas (60, 120 y 180 rpm), la toma de imágenes se efectuó siempre en el cambio de tonalidad azul a amarillo, debido a que visualmente se observa mejor el cambio de tonalidad. El torque se midió con un torquímetro marca FUTEK®.

**Resultados y Discusiones**

Los resultados se presentan en las figuras 6, 7, 8 y 9 en términos de la evolución de la homogeneidad en el proceso de mezclado para todos los escenarios estudiados en función del tiempo. En la tabla 1 se describen las configuraciones utilizadas.

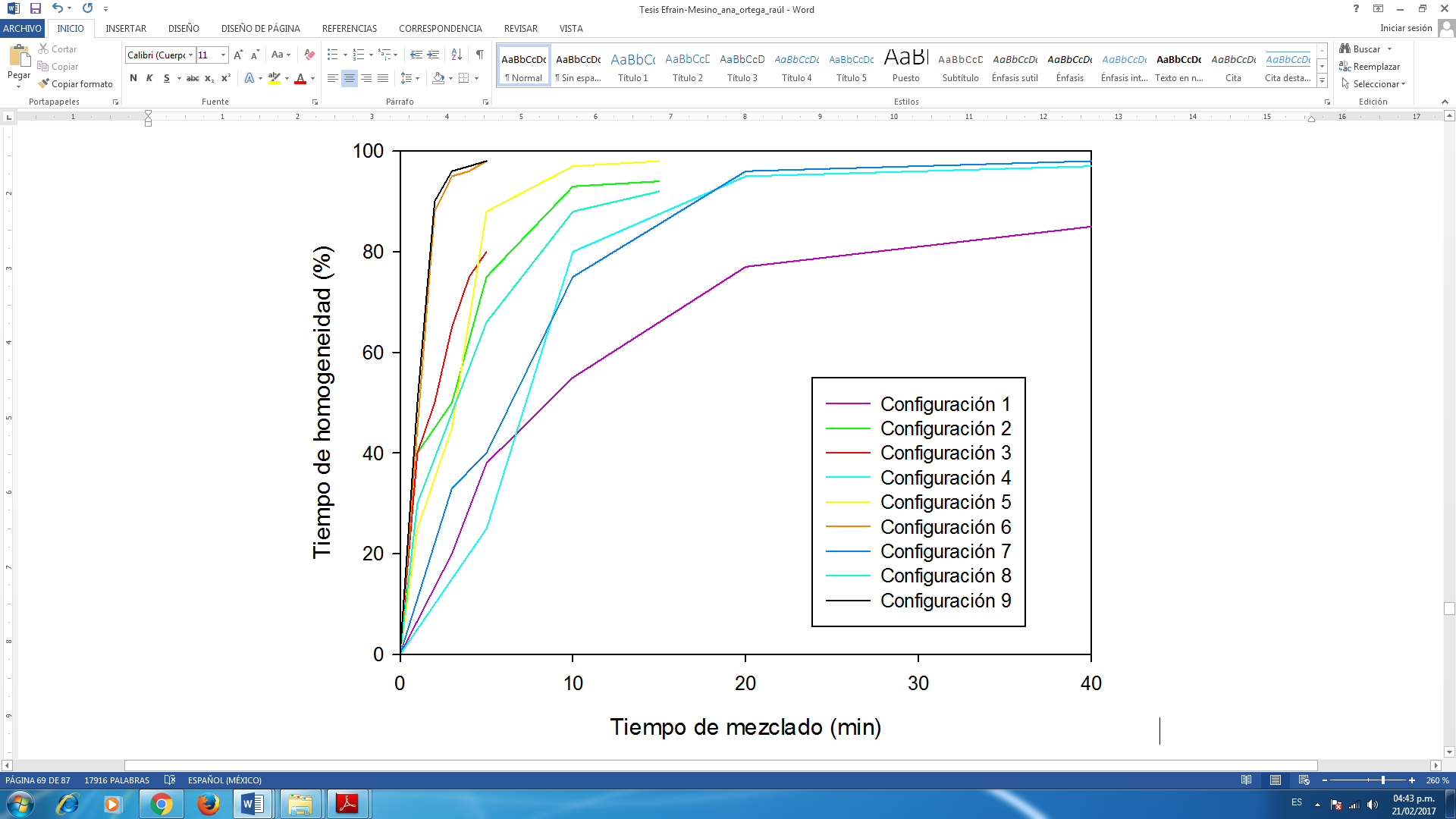
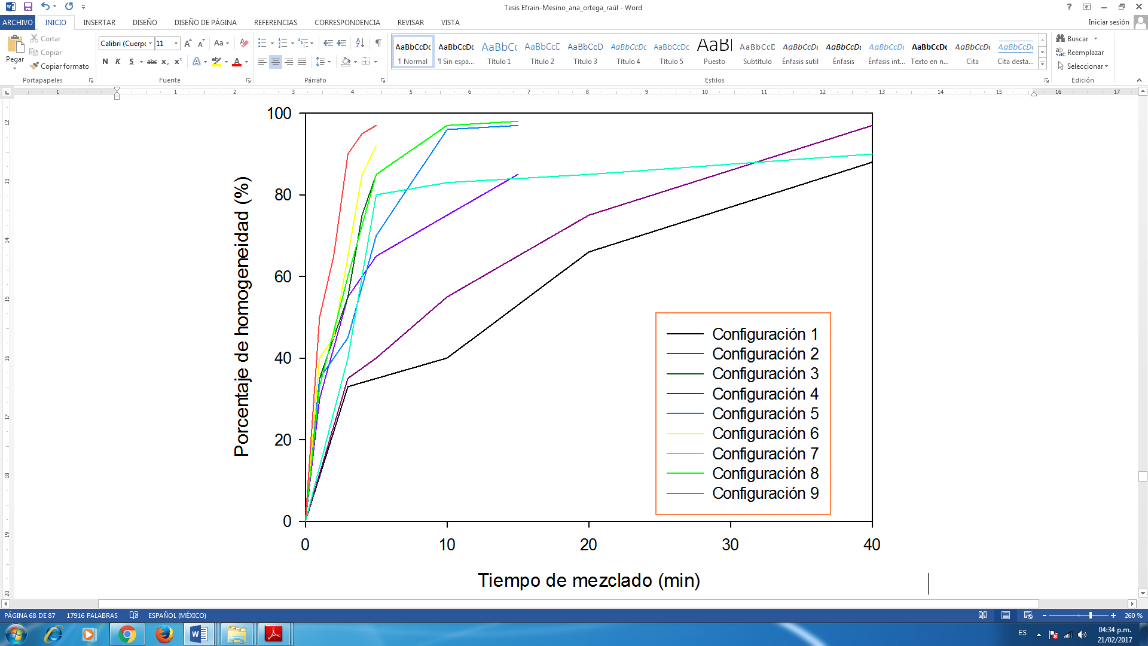
**Tabla 1.** Descripción de las configuraciones utilizadas.

|  |  |
| --- | --- |
| Nombre | Descripción |
| Configuración 1 | Sin perturbación a 60 rpm |
| Configuración 2 | Sin perturbación a 120 rpm |
| Configuración 3 | Sin perturbación a 180 rpm |
| Configuración 4 | Con perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.25 a 60 rpm |
| Configuración 5 | Con perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.25 a 120 rpm |
| Configuración 6 | Con perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.25 a 180 rpm |
| Configuración 7 | Con perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.33 a 60 rpm |
| Configuración 8 | Con perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.33 a 120 rpm |
| Configuración 9 | Con perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.33 a 120 rpm |



**Figura 6.** Evolución de la homogeneidad en el proceso de mezclado del fluido 1, con una turbina Rushton a las diferentes configuraciones estudiada.

**Figura 7.** Evolución de la homogeneidad en el proceso de mezclado del fluido 1, con turbina PBT a las diferentes configuraciones estudiada.



**Figura 8.** Evolución de la homogeneidad en el proceso de mezclado del fluido 2, con una turbina Rushton a las diferentes configuraciones estudiada.

**Figura 9.** Evolución de la homogeneidad en el proceso de mezclado del fluido 2, con una turbina PBT a las diferentes configuraciones estudiada

A partir de estas figuras se puede obtener información relevante con los escenarios estudiados. Entre los datos más importantes aportados se encuentran:

1. Mediante la introducción de objetos en un tanque agitado por un impulsor, se demostró que se alcanza un mayor nivel de homogeneidad en el tanque de mezclado, reduciendo significativamente el tiempo de mezclado, lo cual concuerda con estudios anteriores [2].
2. En el caso de la perturbación geométrica propuesta con una excentricidad de ẋ = 0.25 a las diferentes velocidades y con distinto agitador, el nivel de homogeneidad se incrementa a niveles no alcanzados por las otras configuraciones en el mismo tiempo de mezclado.
3. Esta perturbación propuesta alcanza con ambas posiciones, con las tres velocidades, con los dos tipos de agitadores y los dos fluido de estudio el nivel mínimo establecido como deseable (90%).

En la tabla 2, se resumen las configuraciones más eficientes para cada uno de los escenarios estudiados debido principalmente al menor consumo de energía a una homogeneidad de 90%.

**Tabla** **2.** Arreglos más eficientes en el proceso de mezclado.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Fluido | Agitador | Velocidad (rpm) | Perturbación | Tiempo (s) | Torque  10-3  (N-m) | Potencia  10-3  (W) | Potencia Especifica (W/m3) | Consumo de Energía (KJ/m3) |
|
| 1 | RUSHTON | 60 | ẋ = 0.25 | 600 | 2.696 | 16.941 | 4.8020 | 2.8812 |
| 1 | RUSHTON | 120 | ẋ = 0.25 | 120 | 0.035 | 0.445 | 0.1261 | 0.0151 |
| 1 | RUSHTON | 180 | ẋ = 0.33 | 60 | 2.333 | 43.980 | 12.4660 | 0.7480 |
| 2 | PBT | 60 | ẋ = 0.25 | 1200 | 0.372 | 2.340 | 0.6633 | 0.7960 |
| 2 | PBT | 120 | Sin | 600 | 0.248 | 3.117 | 0.8835 | 0.5301 |
| 2 | PBT | 180 | ẋ = 0.33 | 120 | 1.935 | 36.476 | 10.3391 | 1.2407 |

De acuerdo con esta tabla se tiene que para el fluido 1 se tiene, que la turbina Rushton es la más adecuada para el proceso de mezclado a las tres diferentes velocidades, utilizando la perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.25 para velocidades de agitación menores a 120 rpm y con ẋ = 0.33 a una velocidad de 180 rpm. Para en el caso del fluido 2 a las tres velocidades resulta más adecuada la utilización de una turbina PBT, teniendo mayor eficiencia introduciendo la perturbación con una excentricidad de ẋ = 0.25 y 0.33 a las velocidades de 60 y 180 respectivamente, a 120 rpm resulta más adecuado el proceso de mezclado sin ninguna perturbación.

**Conclusiones**

* La perturbación propuesta con ambas posiciones (ẋ = 0.25 y ẋ = 0.33), revelo que se aumenta considerablemente el grado de homogeneidad en comparación al proceso de mezclado sin perturbación.
* El sistema propuesto es capaz de perturbar estos patrones de flujo, generando una mayor circulación del fluido, disminuyendo así las zonas aisladas dentro del tanque agitado, en especial al ubicar la perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.25.
* En el estudio del consumo de energía a un nivel de homogeneidad aceptable del 90%, en cada uno de los escenarios, se revelo que para el fluido 1 se tiene un menor consumo de energía utilizando la perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.25 a las velocidades de 60 y 120 rpm, y de ẋ = 0.33 para 180 rpm, en cada escenario utilizando turbina Rushton.
* Para en el caso del fluido 2 se tiene un consumo menor de energía utilizando la perturbación a una excentricidad de ẋ = 0.25 a la velocidad de 60 rpm, sin perturbación a 120 rpm y a ẋ = 0.33 a una velocidad de 180 rpm, en los tres casos utilizando una turbina PBT.
* La Perturbación propuesta en este trabajo, elimino las zonas segregadas en el interior del tanque, disminuyo el tiempo de mezclado y alcanzo mayores niveles de homogeneidad, con menor consumo de energía para el proceso de mezclado por lotes.
* Finalmente en este estudio se demostró que el mezclado puede ser mejorado mediante la introducción de una perturbación geométrica dentro de un tanque agitado.

**Bibliografía**

1. Ascanio, G., Brito-Bazan, M., Brito-De La Fuente, E., Carreau, P.J. and Tanguy, P.A., “Unconventional Configuration Studies to Improve Mixing Times in Stirred Tanks”. *Can. J. Chem. Eng*., Vol. 80, p. 558-565, 2002.
2. Takahashi, K. and Motoda, M., "Chaotic mixing created by object inserted in a vessel agitated by an impeller". *Chemical Engineering research and design*, Vol. 87, p. 386–390, 2009.
3. Lamberto, D.J., M.M. Alvarez and F.J. Muzzio, “Experimental and Computational Investigation of the Laminar Flow Structure in A Stirred Tank”, Chem. Eng. Sci., Vol. 54, p. 919-942, 1999.
4. Hidalgo-Millán, A., “Geometric perturbations in mechanically agitated vessels” (Tesis Doctoral).Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Mexico, 2010.
5. Yao, W. G., Sato, H., Takahashi, K. and Koyama, K., ”Mixing performance experiments in impeller stirred tanks subjected to unsteady rotational speeds”, Chem. Eng. Sci., Vol.53, No. 17, p.3031-3040, 1998.
6. Aref, H., “Stirring by chaotic advection”, J. Fluid Mech., Vol. 143, p. 1-21, 1984.
7. Ottino J.M., “Mixing Chaotic Advection and Turbulence”.Ann. Rev. Fl. Mech., Vol. 22, p. 207-253, 1990.
8. Swanson, P.D. and J.M. Ottino, “Acomparative computational and experimental study of chaotic mixing of viscous Fluids”. J. Fluid Mech., Vol. 213, p. 227-249, 1991.
9. Muzzio, F.J., P.D. Swanson and J.M. Ottino, “The Statistics of Stretching and Starting In Chaotic Flows”. Phys. Fluids A, 3, Vol. 25, p. 822-834, 1991.
10. Muzzio, F.J., C. Meneveau, P.D. Swanson and J.M. Ottino, “Scaling and Multifractal Properties of Mixing In Chaotic Flows”. Phys. Fluids A, Vol. 4, 1439-1459, 1992.