

# Análisis de la energía cinética turbulenta en un tanque de agitación aplicando velocimetría por imágenes de partículas

González Neria Israel<sup>1\*</sup>, Martínez Delgadillo Sergio Alejandro<sup>1</sup>, Alonzo García Alejandro<sup>2</sup>,  
Mendoza Escamilla Víctor X.<sup>3</sup>, Yáñez Varela José. Antonio<sup>1</sup>, Rivadeneyra Romero Gabriela<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, Ciudad de México. C.P. 02200. México.

<sup>2</sup>CONACyT-Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Carretera Carmen-Puerto Real km 7.5 s/n, Mundo Maya, C.P. 24150, Cd del Carmen, Campeche.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Electrónica. Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, Ciudad de México. C.P. 02200. México.

<sup>4</sup>Universidad del Istmo, Departamento de Ingeniería de Petróleos. Ciudad Universitaria S/N, Barrio Santa Cruz, 4a. Sección, Tehuantepec C.P. 70760. México.

\* Autor para correspondencia: isrgonner@gmail.com

## Recibido:

16/julio/2019

## Aceptado:

20/octubre/2019

## Palabras clave:

Energía cinética  
turbulenta,  
velocimetría por imágenes  
de partículas,  
resolución angular

## Keywords:

Turbulent kinetic energy,  
particle image velocimetry,  
stirred tank, angle resolved

## RESUMEN

La aplicación de los tanques de agitación se extiende a lo largo de una gran variedad de industrias, como la alimentaria, la química, la minera, la farmacéutica entre otras, teniendo como principal objetivo alcanzar una mezcla homogénea de su contenido, donde la energía mecánica se transforma en energía cinética. Esto produce un incremento de la velocidad y conlleva a la creación de patrones de flujo que se encuentran dentro del tanque. En este trabajo se analizó la energía cinética turbulenta (TKE, por sus siglas en inglés, *Turbulent Kinetic Energy*) mediante la técnica de la velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés, *Particle Image Velocimetry*), utilizando la metodología de la resolución angular. Lo cual permitirá observar su variación conforme el impulsor cambia su posición angular con respecto al plano de medición.

## ABSTRACT

The employment of the stirred tank extends among a wide industry process, such as the food, the chemical, the mineral processing, the pharmaceutical, and so on. Been its principal aim to achieve a homogeneous mixture of its content. Here the mechanical energy is converted to kinetic energy. Yielding to an increase of the velocity flow and the generation of fluid patterns inside the tank. In this work the Turbulent Kinetic Energy (TKE) was evaluated by means of the Particle Image Velocimetry using the angled-resolved approach. This allow to observe the variation of the TKE when the impeller changes its angular position according to the measured plane.

## Introducción

La sencilla implementación del tanque de agitación es el principal motivo de que tantas industrias lo utilicen como parte de sus procesos. Conduciendo a una cantidad significativa de investigadores a realizar estudios que permitan describir las características del flujo que se encuentra dentro del tanque. Bilel (Bikel et al., 2013) estudió la variación que se produce cuando se modifica el ángulo de inclinación de los álabes de un impulsor axial, encontrando que para un ángulo de  $60^\circ$  se presentan la mayor generación de TKE.

Karimi et al. (2012) analizó los efectos que tienen los esquemas de solución numérica, la densidad de la malla y los modelos de turbulencia, al realizar una simulación numérica de un tanque de agitación, mostrando que la TKE es dependiente del número de elementos que conforman la malla, que los modelos k-e RNG y SST proporcionan las mejores aproximaciones, sin embargo, se observa que los valores obtenidos están por debajo de aquellos obtenidos de forma experimental.

Karimi et al. (2012) realizó un estudio donde compara la distribución del flujo y las características que se encuentran en tres tanques de agitación con diferente geometría, encontrando que cuando un tanque de agitación tiene una geometría esférica, presenta una mayor distribución de la TKE.

Meng et al. (2015) efectuó un análisis utilizando tres tipos de impulsores con un enfoque de cultivo de microalgas, encontrando que el impulsor tipo hélice, presentó las mejores características, debido a la mayor generación de la TKE, sus bajos esfuerzos de corte y menores pérdidas de presión. Shekhar et al. (2014) en cambio analizó el flujo de un tanque cuadrado, agitándolo con un impulsor HR-100, mostrando que tanto la TKM como los esfuerzos de corte decrecen conforme se alejan de la superficie inferior del impulsor.

Domanski et al. (2014) por su parte realizó una simulación numérica de un tanque de agitación utilizando el método de la escala adaptativa-transporte de esfuerzos cortante, en el cual utilizó un impulsor HE 3 de forma excéntrica, para agitar al fluido, encontrando que los mayores niveles de TKE se presentan a la altura del impulsor y por encima de éste.

Con base en lo antes mencionado se aprecia el interés de la comunidad científica por entender el comportamiento que tiene el flujo dentro de un tanque de agitación, tanto de manera experimental como numérica.

Por tal motivo, en el presente trabajo se realizó la medición del campo de velocidades de un tanque de

agitación con el objetivo de analizar la TKE implementando la metodología de la resolución angular.

## Metodología

### Arreglo experimental

Las mediciones del campo de velocidades instantáneas se realizaron dentro de un tanque cilíndrico hecho de acrílico, el cual tiene un fondo plano y cuatro deflectores distribuidos de forma equidistante en su pared interior. El diámetro del tanque es  $T = 25$  cm y las paredes son de 2 mm de espesor, tal como se muestra en la Figura 1.

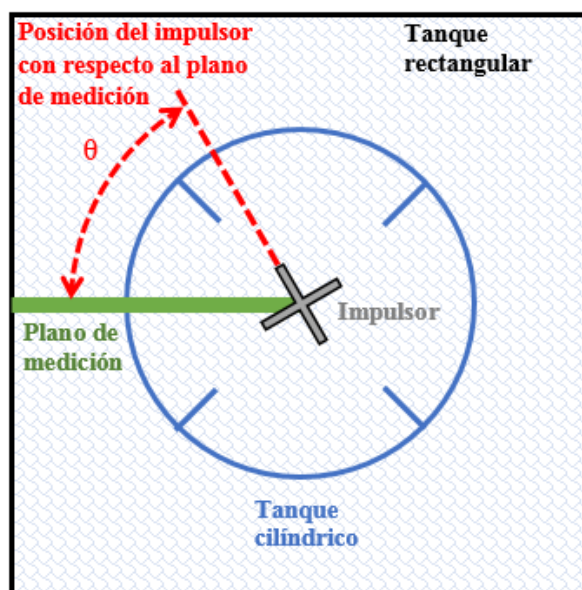


Figura 1. Esquema del arreglo experimental.

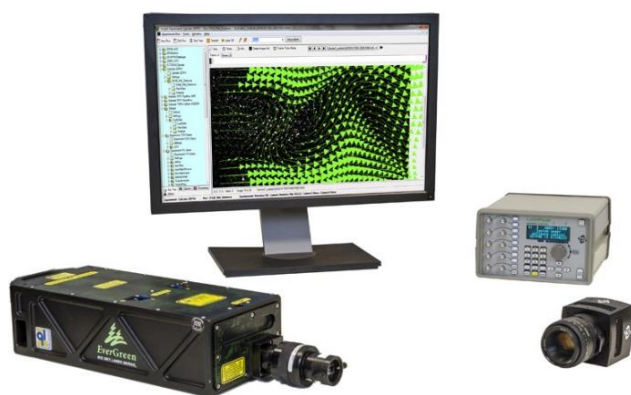
Se utilizó un tanque rectangular, en el cual se sumerge el tanque cilíndrico, con el propósito de contrarrestar los efectos de la refracción del haz de luz emitido por el láser. El fluido de trabajo es agua bidestilada ( $\rho = 998.2$  kg/m<sup>3</sup> y  $\mu = 0.001003$  Pa·s). Ambos tanques se llenan hasta una altura de  $H = T$ . Para llevar a cabo la agitación se utilizó un impulsor de cuatro álabes con una inclinación de  $45^\circ$ , el cual tiene un diámetro de  $D = 80$  mm y se encuentra a una distancia  $C = 1/3T$  del fondo del tanque. Un motor eléctrico induce el movimiento del impulsor, el cual se fija en una velocidad de 500 rpm, por lo que se tiene una condición totalmente turbulenta dentro del tanque de agitación ( $Re \approx 52\ 000$ ).

El sistema de velocimetría por imágenes de partículas consta de un láser, una cámara de alta velocidad y un sincronizador, tal como se muestra en la Figura 2. El primer elemento, es capaz de emitir un par de haces de luz con una longitud de onda de 532 nm, a una frecuencia de 15 Hz con una potencia de 75 mJ. El segundo tiene una

resolución de 2360 x 1776 pixeles, siendo capaz de capturar 16 cuadros por segundo, con una lente de 50 mm F/1.8. El tercer es el encargado de sincronizar el disparo del láser con la captura de la imagen por parte de la cámara.

### Resolución angular

La metodología de la resolución angular consiste en la medición del campo de velocidades para diferentes posiciones angulares del impulsor con respecto al plano de medición (Khan et al., 2006; Khan et al., 2004; Yianneskis et al., 1993; Ducci et al., 2006; Wu et al., 1989). Esto permite analizar el comportamiento del flujo conforme el impulsor realiza un movimiento de rotación. En el presente trabajo se realizaron mediciones en 18 planos diferentes, los cuales están separados por un  $\Delta\theta = 5$ , tal como se muestra en la Figura 1.



**Figura 2.** Sistema de velocimetría por imágenes de partículas (Kenelec).

### Energía cinética turbulenta

La ec. (1) se utiliza para el cálculo de la energía cinética turbulenta, sin embargo, requiere conocer las tres componentes fluctuantes de la velocidad. Debido a que en el presente estudio se utilizó un sistema bidimensional, se considera que el flujo es isotrópico. Lo que permite realizar una aproximación del tercer componente con la información disponible, ec. (2) (Gabriele et al., 2009). De tal modo al sustituir la ec. (2) en la ec. (1) se obtiene la ec. (3), la cual se utilizó para el cálculo de la TKE.

$$\kappa = 0.5(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (1)$$

$$w'^2 = (u'^2 + v'^2) \quad (2)$$

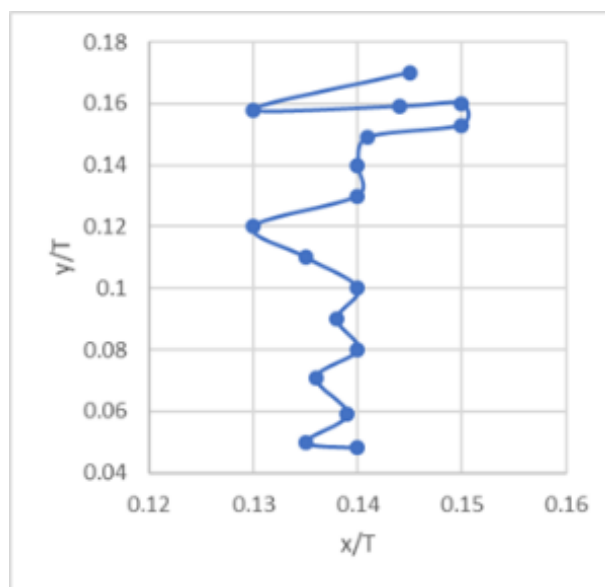
$$\kappa = 0.75(u'^2 + v'^2) \quad (3)$$

Se hace notar que los valores obtenidos durante las mediciones son las velocidades instantáneas del campo de flujo. Por tal motivo, se requiere aplicar la descomposición de Reynolds, ec. (4), a las componentes de la velocidad,  $u$  y  $v$  (Sheng et al., 2000; Sharp et al., 2001). De esta forma se obtendrá la parte fluctuante que se requiere en la ec. (3).

$$u = \bar{U} + u' \quad (4)$$

### Resultados y discusión

En la figura 3, se muestra la variación de las zonas de mayor magnitud dentro del tanque de agitación, donde se observa que la variación radial es relativamente significativa en la zona cercana al impulsor, ya que conforme se desplaza al fondo del tanque el desplazamiento es menor. Teniendo así que la variación es mayor en la dirección axial ( $\approx 13\%$ ) en comparación de aquella en la dirección radial ( $\approx 2\%$ ).



**Figura 3.** Posición de los valores máximos de la TKE.

En la figura 4, por brevedad se muestran 9 de los 18 planos de medición que se obtuvieron mediante la resolución angular. Teniendo que cuando  $\theta = 0^\circ$ , Figura 4(a), corresponde a la posición donde el plano de medición se localiza en la parte media del álabe. Se observa que las zonas de mayor intensidad (zonas de color rojo) comienzan a formarse en la punta del impulsor para un  $\theta = 10^\circ$ , Figura 4(b), incrementándose conforme el impulsor va rotando.

Asimismo, se observa que estas zonas se forman únicamente en el borde inferior cercano a la punta del álabe.

Conforme  $\theta$  se va incrementando, esta zona tiende a acumularse en la zona de descarga. Presentándose una separación de la superficie del impulsor para  $\theta = 60^\circ$ , figura 4(g). Sumado a lo anterior, se aprecia que estas zonas se mantienen en un rango de  $0.12 \leq x/T \leq 0.17$ , para todos los valores de  $\theta$ .

Por otra parte, se tiene que alrededor de  $\theta = 30^\circ$ , figura 4(d), la zona que se está formando en la punta del álabe se empieza a mezclar con aquella que se desprendió del álabe anterior, provocando que estas zonas tiendan a expandirse en dirección del eje conforme se desplazan al fondo del tanque, figura 4(a)-(i). Se aprecia claramente que la zona debajo del impulsor es donde se genera la mayor cantidad de energía cinética turbulenta, lo que indica que en esta zona la turbulencia del flujo es mayor, que es también donde se esperan encontrar vórtices con un alto contenido energético.

### Conclusiones

Se observa que solo una pequeña zona situada debajo del impulsor concentra la mayor cantidad de la energía cinética turbulenta. Por lo cual se espera que en esta zona se intensifique el mezclado, debido a que aquí se encontrará el flujo más turbulento y los vórtices con la mayor cantidad de energía. Sumado a lo anterior, se considera que esta zona es la indicada en el caso de que se requiera agregar una fase adicional dentro del tanque, debido a que en esta zona se presentara su mejor dispersión. Como la mezcla de líquidos miscibles, la dispersión de gas en un líquido, la emulsificación o la dilución de un sólido dentro de un líquido. Por lo cual el tiempo del proceso será reducido y el proceso tendrá una mayor eficiencia.

### Referencias

Amira B. B., Driss Z., Karray S., Abid M. S. (2013). *PIV study of the down-pitched blade turbine hydrodynamic structure*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 237.

Ammar M., Driss Z., Chtourou W., Abid M. S. (2012). *Effect of the Tank Design on the Flow Pattern Generated with a Pitched Blade*, International Journal of Mechanics and Applications 2 12.

Domanski M., Karcz J., Bitenc M. (2014). *Scale-adaptive simulation of liquid mixing in an agitated equipped with eccentric HE 3 impeller*, Chemical Paper 68 889.

Ducci A., Yianneskis M. (2006). *Turbulence kinetic energy transport processes in the impeller stream of stirred vessels*, Chemical Engineering Science 61 2780.

Gabriele A., Nienow A. W., M. J. H. Simmons. (2009). *Use of angle resolved PIV to estimate local specific energy dissipation rates for up- and down-pumping pitched blade agitators in a stirred tank*, Chemical Engineering Science, 64 126.

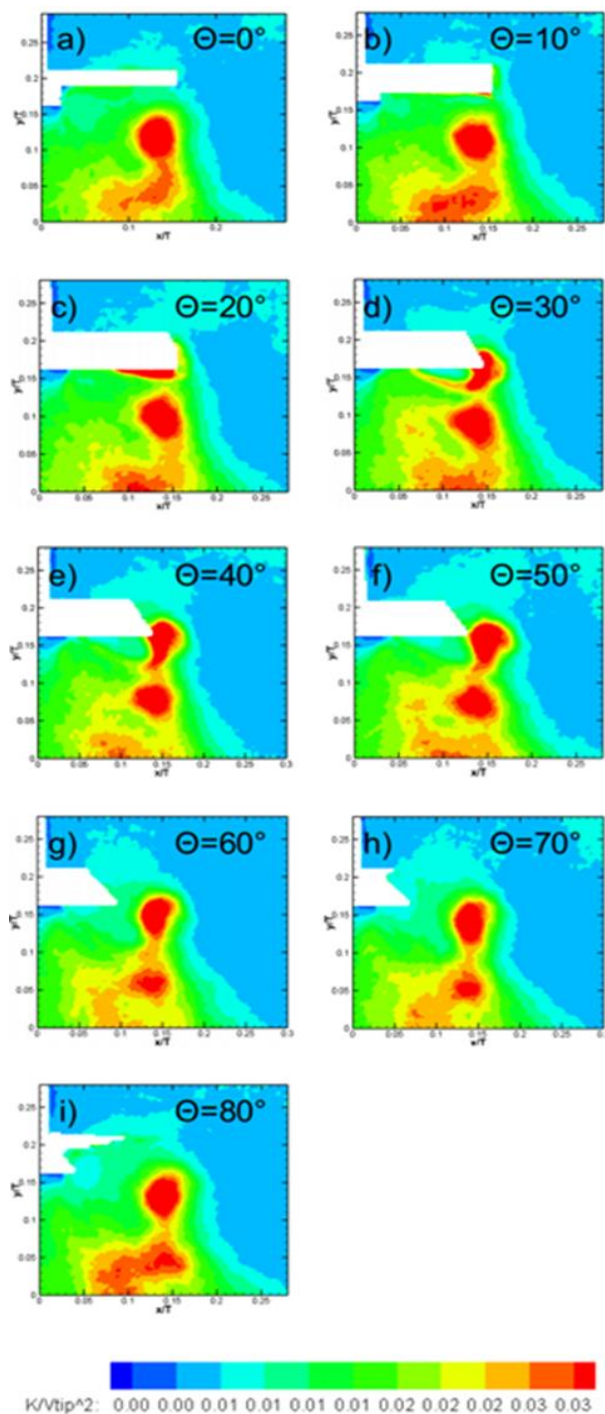


Figura 4. Posición de los valores máximos de la TKE.

Karimi M., Akdogan G., Bradshaw S. M. (2012). *Effects of different mesh schemes and turbulence models in CFD modelling of stirred tanks*, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 48 513.

Kenelec, *2D measurement PIV system*, <https://www.kenelec.com.au/products/tsi-2d-measurement-piv-system>.

Khan F. R., Rielly C. D., Hargrave G. K. (2004). *A multi-block approach to obtain angle-resolved PIV measurements of the mean flow and turbulence fields in a stirred vessel*, Chemical Engineering and Technology 27(3) 264.

Khan F. R., Rielly C. D., Brown D. A. R. (2006). *Angle-resolved stereo-PIV measurements close to a down-pumping pitched-blade turbine*, Chemical Engineering Science 61 2799.

Meng C., Huang J., Ye C., Cheng W., Chen J., Li Y. (2015). *Comparing the performances of circular ponds with different impellers by CFD simulation and microalgae culture experiments*, Bioprocess and Biosystems Engineering 38 1347.

Sharp K. V., Adrian R. J. (2001). *PIV Study of small-scale flow structure around a Rushton turbine*, Fluid Mechanics and Transport Phenomena 47766.

Sheng J., Meng H., R. O. Fox. (2000). *A large eddy PIV method for turbulence dissipation rate estimation*, Chemical Engineering Science 55 4423.

Sherkhar C., Takahashi K., Matsunaga T., Nishino K. (2014). *Tomographic PIV measurement of turbulent characteristics and maximum shear stress in squared-shaped stirred flow mixer*, The 16th International Symposium on Flow Visualization 16 1.

Wu H., Patterson G. K. (1989). *Laser-Doppler measurements of turbulent flow parameters in a stirred mixer*, Chemical Engineering Science 44 2207.

Yianneskis M., Whitelaw J. (1993). *On the structure of the trailing vortices around Rushton turbine blades*, Chemical Engineering Research & Design 71 543.