



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN MONO Y BI-IMPULSOR EN TANQUES CILÍNDRICOS: UN ESTUDIO CFD

**INFLUENCE OF SINGLE- AND DUAL-IMPELLER
CONFIGURATIONS IN CYLINDRICAL TANKS: A CFD STUDY**

Arturo Lizardi Ramos

Universidad Autónoma Metropolitana – México

David Esaú Carbajal López

Instituto Politécnico Nacional – México

Hilario Terres Peña

Universidad Autónoma Metropolitana – México

Sandra Chávez Sánchez

Universidad Autónoma Metropolitana – México

René Rodríguez Rivera

Universidad Autónoma Metropolitana - México

Influencia de la Configuración Mono y Bi-Impulsor en Tanques Cilíndricos: Un Estudio CFD

Arturo Lizardi Ramos¹

arlr@azc.uam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6879-3057>

Universidad Autónoma Metropolitana

Ciudad de México, México

David Esaú Carbajal López

dcarbajal2200@alumno.ipn.mx

<https://orcid.org/0009-0003-8125-6007>

Instituto Politécnico Nacional

Ciudad de México, México

Hilario Terres Peña

tph@azc.uam.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7996-5734>

Universidad Autónoma Metropolitana

Ciudad de México, México

Sandra Chávez Sánchez

scs@azc.uam.mx

<https://orcid.org/0009-0005-7029-5945>

Universidad Autónoma Metropolitana

Ciudad de México, México

René Rodríguez Rivera

rerori@azc.uam.mx

<https://orcid.org/0009-0003-2148-9757>

Universidad Autónoma Metropolitana

Ciudad de México, México

RESUMEN

Las simulaciones CFD demuestran que el número de impulsores modifica la hidrodinámica de un tanque cilíndrico agitado. Con un solo rotor, el chorro axial genera una recirculación centrada en el plano del impulsor; fuera de esa franja ($0.02 < z < 0.06$ m) las velocidades caen por debajo de 0.05 m/s y la turbulencia máxima promedio ($k \approx 5.10 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$) describe una campana asimétrica. Esto propicia zonas muertas junto a las paredes, estratificación en la mitad superior y riesgo de sedimentación en el fondo. La adición de un segundo impulsor duplica los focos de energía cinética y enlaza las celdas de recirculación, el perfil axial exhibe dos picos de 0.15-0.18 m/s y una franja intermedia de 0.06-0.12 m/s, mientras que la turbulencia se incrementa hasta un orden de magnitud ($k > 6.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$). El arreglo dual reduce de forma sensible el tiempo de mezcla macroscópica, mejora la suspensión de sólidos y eleva los coeficientes locales de transferencia de calor y masa. La configuración de dos impulsores se recomienda para procesos que exigen mezcla rápida y uniforme en tanques altos o fluidos de viscosidad media-alta; el diseño de un solo rotor sólo resulta adecuado cuando la potencia disponible es muy restrictiva.

Palabras clave: CFD, impulsor, hidrodinámica

¹ Autor principal

Correspondencia: carbajallopezdavidesau@gmail.com

Influence of Single- and Dual-Impeller Configurations in Cylindrical Tanks: A CFD Study

ABSTRACT

CFD simulations demonstrate that the number of impellers modifies the hydrodynamics of a stirred cylindrical tank. With a single rotor, the axial jet generates a recirculation centered on the impeller plane; outside this band ($0.02 < z < 0.06$ m) velocities drop below 0.05 m/s, and the maximum average turbulence ($k \approx 5.10 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$) describes an asymmetrical bell. This promotes dead zones near the walls, stratification in the upper half, and a risk of sedimentation at the bottom. The addition of a second impeller doubles the kinetic energy foci and links the recirculation cells; the axial profile exhibits two peaks of 0.15–0.18 m/s and an intermediate band of 0.06–0.12 m/s, while turbulence increases by up to an order of magnitude ($k > 6.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$). The dual arrangement significantly reduces the macroscopic mixing time, improves solid suspension, and increases local heat and mass transfer coefficients. The two-impeller configuration is recommended for processes requiring fast and uniform mixing in tall tanks or medium-to-high viscosity fluids; the single-rotor design is only suitable when the available power is highly restrictive.

Keywords: CFD, impeller, hydrodynamics

Artículo recibido 15 febrero 2023
Aceptado para publicación: 15 marzo 2023



INTRODUCCIÓN

La agitación y el mezclado de una o más sustancias, en tanques abiertos o cerrados, son operaciones unitarias que tienen como objetivo homogeneizar fluidos líquidos o gases. La agitación implica el promover el movimiento de un líquido o una sustancia, para mezclar, disolver o suspender componentes. Se emplea para homogeneizar mezclas, acelerar reacciones químicas, mantener temperaturas uniformes, etc. Por otro lado, el mezclado es un proceso que combina dos o más sustancias para obtener una mezcla uniforme.

Ambos procesos se pueden realizar de forma manual o mediante equipos industriales especializados como: mezcladores, homogeneizadores, agitadores de alta velocidad, etc. Dichos procesos son esenciales para la industria farmacéutica, química, alimentaria, de pintura, etc. A pesar del uso extendido de la agitación y el mezclado en cámaras cilíndricas, para las industrias anteriormente mencionadas, no se cuenta con suficiente información teórica, sobre el comportamiento del flujo, al variar los múltiples parámetros que se encuentran implicados, pues en su mayoría éstos han sido obtenidos de manera empírica y/o experimental.

En los últimos años, se han propuesto impulsores alternativos y criterios de eficiencia energética que demuestran reducciones de consumo de potencia frente al Rushton clásico (Buwa *et al.*, 2006). Por ello, en la actualidad, se utilizan frecuentemente herramientas computacionales para obtener información de manera rápida y confiable. La Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) ha mostrado, por ejemplo, que la selección adecuada de modelos de turbulencia y esquemas de malla permite predecir con buena fidelidad tiempos de mezclado, números de potencia y distribución de energía en reactores agitados (Sahu *et al.*, 1999).

El estudio numérico del movimiento de un fluido en el interior de cámaras cilíndricas comenzó en 1972 (Pao, 1972), donde se propuso un método numérico para estudiar el flujo de un fluido viscoso confinado en un depósito cilíndrico donde la tapa superior estaba girando a una velocidad angular constante, mientras las paredes y fondo del recipiente permanecían fijos. Se presentó el análisis de la función corriente, la circulación, la distribución de velocidades y el coeficiente de par para un rango del número de Reynolds de 1 a 400. Se han realizado estudios numéricos del flujo en una cámara cilíndrica cerrada con un disco giratorio situado muy cerca del fondo y cuyo radio es menor al del depósito (Yu *et al.*,

2007).

El comportamiento del flujo se ha investigado también para una amplia gama de parámetros. Se analizaron, en el plano meridional, las líneas de corriente, momento angular y vorticidad, para diferentes Reynolds (1000, 1500 y 2000), relación geométrica H/R (1.5) y relación de radios R/r_d (1.5, 1.8, 2.0, 2.2, 2.6, 3.0, 5.0). Otros investigadores han estudiado variables en un tanque agitado con impulsores de pala inclinada PBT (Pitched Blade Turbine) compuestos por seis álabes y con flujo descendente. En el recipiente simulaban flujos multifásicos de gas-líquido a una velocidad angular constante de 480 rpm y dos inclinaciones de álabes: 45° y 60° (Achouri *et al.*, 2012).

Se han utilizado modelos numéricos para fluidos complejos con agitadores de dos placas planas verticales e inclinadas, donde se analizaron los efectos del ángulo de inclinación de las palas sobre las características locales y globales de la mezcla, y se estudió el efecto del Reynolds con el comportamiento reológico de la mezcla (Ameur, 2016). Se ha investigado la variación de la velocidad angular entre 200 y 700 rpm, comprobando que la inconformidad es del 10%, concordando así con lo reportado en la literatura (Chamberg *et al.*, 2017).

Se han investigado mezcladores para biofertilizantes; dentro de los resultados se destacó que el uso de baffles y el uso de una turbina de disco aumentaron la capacidad de producción y mejoraron el mezclado en comparación con depósitos agitados sin el uso de estos elementos (Rozo, 2020).

Adicionalmente, el diseño de impulsores de geometría no convencional, como el Maxblend, ha mostrado mejoras significativas en potencia, homogeneidad y escalamiento en fluidos viscosos (Iranshahi *et al.*, 2007). En sistemas con intercambio térmico, el empleo de serpentines helicoidales internos o de baffles tubulares verticales requiere disponer de correlaciones adimensionales (Nu , Re , Pr) que tomen en cuenta la influencia del impulsor y del régimen de flujo. Estudios recientes proponen expresiones para estimar coeficientes globales de transferencia de calor en tanques agitados (Silva *et al.*, 2017).

Por otra parte, la geometría y configuración de baffles tubulares influye notablemente en el número de potencia y, por ende, en la eficiencia energética del reactor. Se ha evidenciado que la reducción del claro pared-baffle o la agrupación en módulos modifican la distribución de velocidad y turbulencia (Major y Karcz, 2018). En cuanto a fluidos no Newtonianos de tipo pseudoplásticos, mediciones LDA y simulaciones RANS indican que la similitud de Reynolds se alcanza para valores superiores a 500,

siendo posible formular correlaciones de velocidad y energía cinética que abarcan un amplio rango de índices de flujo (Venneker *et al.*, 2010). Finalmente, enfoques CFD recientes comparan distintos tipos de agitadores (turbina Rushton, palas circulares y triángulos divergentes) y demuestran ventajas en consumo de potencia y control del vórtice superficial al emplear diseños convergentes (Foukrach *et al.*, 2020).

En esta investigación se pretende analizar el comportamiento del flujo de un fluido newtoniano, incomprensible, viscoso, en estado estacionario, contenido en un depósito cilíndrico vertical cerrado con fondo semielíptico y con baffles en sus paredes. El movimiento del fluido se genera con una flecha que gira en sentido horario y que tiene dos impulsores: uno en su extremo y otro en su punto medio, con tres alabes rectos inclinados a 30° respecto al centro de la flecha. Se manejan dos arreglos: tanque con un impulsor y con dos impulsores.

El modelo matemático empleado se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas polares cilíndricas. Los resultados se examinarán al obtener los campos del vector velocidad, comparar sus magnitudes en puntos de interés, y finalmente analizar el comportamiento de la velocidad y la energía cinética específica de turbulencia a lo largo de la coordenada radial, con el propósito de determinar cualitativa y cuantitativamente cuál de las dos configuraciones de impulsores induce una mayor intensidad de mezclado y agitación hidrodinámica.

METODOLOGÍA

El estudio del comportamiento hidrodinámico se desarrolló mediante simulaciones numéricas basadas en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Se utilizó el código comercial ANSYS Fluent, el cual opera bajo el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de transporte. Con el objetivo de garantizar la reproducibilidad del estudio, la metodología se presenta desglosada en los siguientes componentes críticos:

2.1 Dominio Computacional: Descripción de la geometría y el volumen de control.

2.2 Ecuaciones Gobernantes y Condiciones de Frontera: Formulación matemática del modelo de flujo y parámetros físicos impuesto al modelo.

2.3 Mallado: Análisis de convergencia de mallado.

Dominio computacional

El dominio computacional se muestra en las Figuras 1 y 2, está constituido por un recipiente cilíndrico vertical cerrado con un radio interior de 0.045 m y una altura de 0.09 m, rematado inferiormente por un fondo semielíptico de 0.03 m de profundidad. El tanque incorpora seis baffles distribuidos uniformemente sobre la pared cilíndrica, cada uno de 0.09 m de longitud y 0.015 m de ancho.

En el interior se aloja un eje de 0.005 m de radio y 0.095 m de longitud, equipado con un conjunto de dos impulsores de flujo axial: el primero se sitúa en el extremo de la flecha y el segundo a la mitad de ésta.

Figura 1. Vista isométrica, vista frontal y vista superior del sistema a analizar

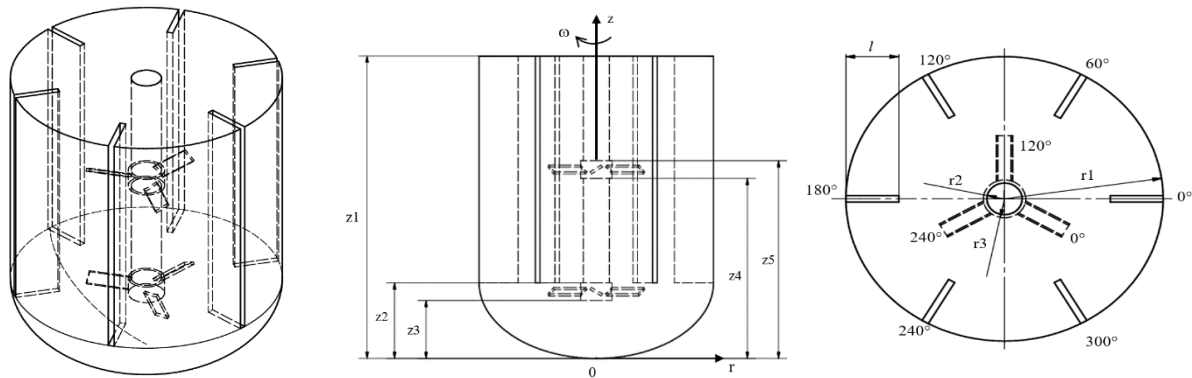
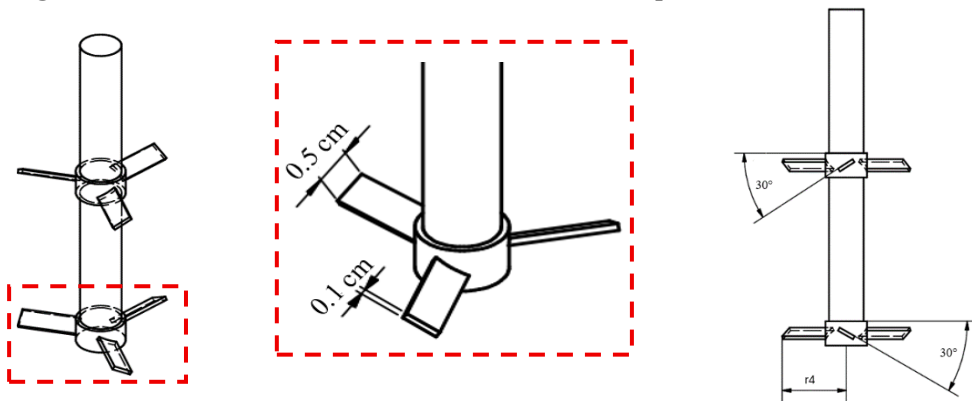


Figura 2. Vista isométrica, detalle en la zona de los impulsores y vista frontal del eje e impulsores



Cada impulsor de 0.02 m de radio cuenta con tres álabes rectos de 0.005 m de altura y 0.001 m de espesor, inclinados 30° respecto al eje. Ambos impulsores se fijan mediante un buje de 0.006 m de radio exterior y 0.007 m de longitud. El impulsor gira en sentido horario a una velocidad angular constante de 13.61 rad/s. La sustancia utilizada es agua, la cual se considera como un fluido viscoso e incompresible con propiedades físicas constantes.

El impulsor de flujo axial ubicado en el extremo inferior, con el ángulo propuesto y al girar en sentido

horario, induce al fluido a desplazarse hacia el fondo del recipiente, mejorando así la circulación y evitando sedimentaciones. Por otra parte, el segundo impulsor, colocado en la parte central del eje y con su respectivo ángulo, favorece el movimiento en la zona superior del recipiente. Esto aumenta la turbulencia dentro del sistema, así como el mezclado. El propósito del segundo impulsor es generar turbulencia en el centro y parte superior del depósito.

Ecuaciones gobernantes y condiciones de frontera

Las expresiones de la física-matemática que definen el movimiento de un fluido newtoniano, incomprensible, viscoso, en estado estacionario, en el interior de un depósito cilíndrico, son las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas (Landau y Lifshitz, 1982; Tijonov y Samarsky, 1980).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left[\nabla^2 u - \frac{u}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \nu \left[\nabla^2 v - \frac{v}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] \quad (3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 w + g \quad (4)$$

En estas ecuaciones se tienen como incógnitas las tres componentes de la velocidad: radial (u), azimutal o tangencial (v), y axial (w); y la presión (P). Además, la presión en el seno del fluido depende de estas componentes de velocidad. Las condiciones de frontera para el arreglo con dos impulsores de flujo axial y con baffles se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de frontera para el sistema con dos impulsores

$r = 0$ $0 \leq z \leq z_1$	$u = 0,$	$v = 0,$	$\frac{\partial w}{\partial r} = 0$	(5)
$(r_1 - l) \leq r \leq (r_1)$ en $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ$ y 300° $z_2 \leq z \leq (z_1 - z_2)$	$u = 0,$	$v = 0,$	$w = 0$	(6)
$0 \leq r \leq r_1, \quad z = z_1$	$u = 0,$	$v = 0,$	$w = 0$	(7)
$r = r_2$ $z_2 \leq z \leq (z_1 - z_2);$ $r = r_3$ $z_3 \leq z \leq (z_2 - z_3);$ $r = r_3$ $z_4 \leq z \leq (z_5 - z_4);$ $r = r_4$ $z_3 \leq z \leq (z_2 - z_3)$ y $z_4 \leq z \leq (z_5 - z_4)$ en $0^\circ, 120^\circ$ y $240^\circ;$ $r_3 \leq r \leq r_4, \quad z = z_2, z = z_4, z = z_5,$ y $0^\circ, 120^\circ$ y $240^\circ;$ $0 \leq r \leq r_4, \quad z = z_3$ y $0^\circ, 120^\circ$ y 240°	$u = 0,$	$v = \omega r,$	$w = 0$	(8)

En las ecuaciones anteriores r_1 , r_2 , r_3 y r_4 corresponden al radio del tanque, flecha, buje e impulsores, respectivamente; z_3 , z_2 y z_1 son las distancias desde el fondo del depósito hasta el impulsor del extremo, parte recta y tapa del recipiente, respectivamente; z_4 y z_5 son las distancias desde el fondo del tanque hasta el impulsor central; l es la anchura del baffle y ω es la velocidad angular a la que gira la flecha y los impulsores.

Las condiciones de frontera que se le han asignado a los álaves de los impulsores de flujo axial son las de no deslizamiento y la ecuación $v = \omega r$. Para el fondo del tanque y superficie de los baffles, también se le asignó la condición de frontera de no deslizamiento.

Para obtener los valores de la energía cinética específica turbulenta (k) se utilizó el modelo SST k -omega (Shear Stress Transport), el cual se emplea para simular flujos turbulentos de manera precisa en regiones cercanas a las paredes y en zonas de alto gradiente de cizalladura (Menter *et al.*, 2003; Sen *et al.*, 2021), su expresión es:

$$\overline{u_i u_j} = \mu_t \left[\frac{\partial(u_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial(u_j)}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (9)$$

donde μ_t es la viscosidad dinámica de turbulencia (kg/m s), k es la energía cinética específica de turbulencia (m^2/s^2) y δ_{ij} es el delta de kronocker. Adicionalmente se requieren de ecuaciones de transporte adicionales para resolver las ecuaciones de RANS.

Para nuestro caso se utilizan dos ecuaciones, la ecuación de la energía cinética específica de turbulencia (k) y la ecuación de la frecuencia específica de disipación (ω). La energía cinética específica de turbulencia está dada por:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (10)$$

Mientras que la frecuencia específica de disipación está dada por:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \frac{\omega}{k} \rho k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (11)$$

La ecuación (10) se muestra en coordenadas cartesianas, para coordenadas cilíndricas se tiene:

$$\frac{\partial(\rho_l k)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho_l u k)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho_l v k)}{\partial \gamma} + \frac{\partial(\rho_l w k)}{\partial z} = P_k - \beta^* \rho_l k \omega + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r (\mu_l + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial r}) \quad (12)$$

donde ρ_l es la densidad del líquido, μ_l es la viscosidad dinámica del líquido, μ_t es la viscosidad turbulenta, P_k es el término de producción de la energía cinética específica turbulenta. Los términos

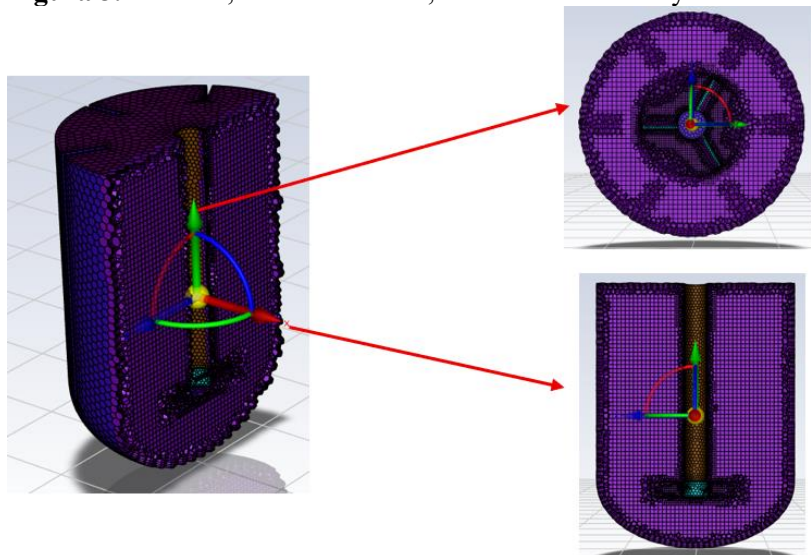
$\beta^*, \beta, \sigma_k, \sigma_\omega, \alpha, \sigma_{\omega 2}$ son coeficientes empíricos del modelo. F_1 es la función de mezcla que permite la combinación de los modelos $k - \omega$ y $k - \varepsilon$ en la formulación SST.

Al resolver la ecuación se obtiene la energía cinética específica de turbulencia en m^2/s^2 , la cual es una medida cuantitativa de la intensidad de la turbulencia para un flujo, ésta es la magnitud de la fluctuación de la velocidad del flujo. Finalmente, las ecuaciones (1) a (8) se resuelven para obtener las componentes de velocidad: radial, u, tangencial, v, y axial, w, y la presión, P, y de allí se calcula la energía cinética específica turbulenta (k) con la ecuación (12).

Mallado

Para asegurar la consistencia en la comparación de los resultados, se empleó una metodología de mallado idéntica en los dos escenarios evaluados. El dominio computacional se discretizó utilizando la técnica poly-hexcore (Figura 3), lo que permitió un control riguroso sobre la resolución espacial en las regiones críticas. A partir de un análisis de independencia de malla, se concluyó que resoluciones de 449,311 y 558,812 nodos para los casos de mono y bi impulsor, respectivamente, proporcionan un equilibrio óptimo entre la exactitud numérica y el costo computacional.

Figura 3. Mallado; vista isométrica, sección transversal y sección longitudinal



Asimismo, la calidad geométrica del mallado se verificó mediante las métricas de calidad ortogonal (*Orthogonal Quality*) y asimetría (*Skewness*), obteniendo valores de 0.8964 y 0.8884 para los casos mono y bi-impulsor en la calidad ortogonal, y de 0.7886 y 0.7972 para la asimetría, respectivamente.

De acuerdo con los criterios de las Tablas 2 y 3, ambos parámetros confirman una discretización de buen nivel, garantizando la fiabilidad de las simulaciones.

Tabla 2. Métrica de mallado Orthogonal Quality

Inaceptable	Malo	Aceptable	Bueno	Muy bueno	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

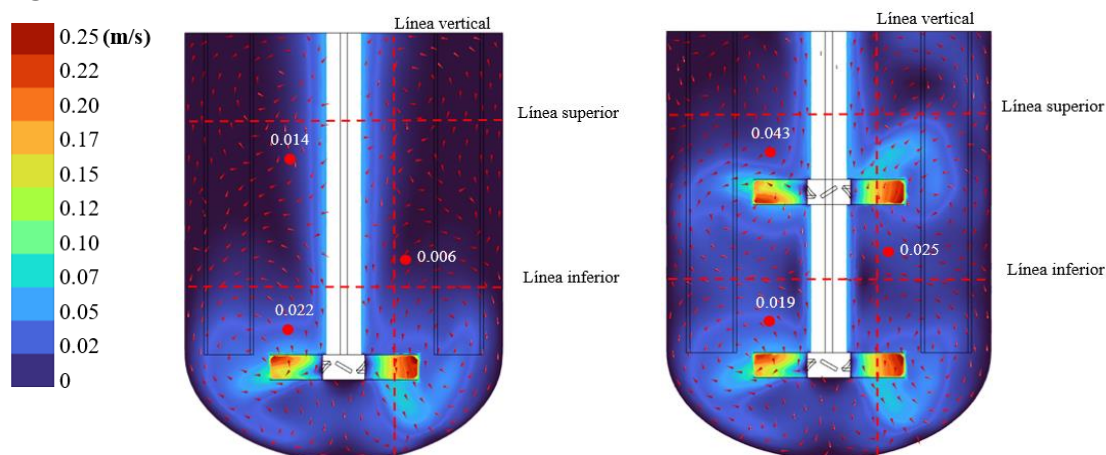
Tabla 3. Métrica de mallado Skewness.

Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Inaceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones CFD realizadas demuestran la influencia marcada que tiene el número de impulsores sobre la hidrodinámica interna del tanque cilíndrico. Cuando se instala un solo impulsor (Figura 4a), una parte del chorro axial que emerge del rotor provoca un movimiento circulatorio en el fondo del tanque, mientras que otra parte asciende por las paredes cilíndricas, llega hasta la frontera superior y, tras impactar en ella, desciende cerca del eje de rotación, generando otra celda de recirculación. La mayor parte de la energía cinética se concentra en las proximidades del impulsor y del eje de rotación. Por encima de la línea superior de análisis ($z=0.1$ m) predominan velocidades menores a 0.07 m/s, lo que anticipa regiones con mezcla deficiente y estratificación composicional. Al incorporar dos impulsores (Figura 4b), uno cercano al fondo y otro a la mitad de la parte recta del depósito ($z=0.062$ m), se generan dos chorros axiales superpuestos que alimentan la recirculación.

Figura 4. Campos de velocidad y líneas de análisis para a) un impulsor, b) dos impulsores.



Dichos chorros abarcan prácticamente todo el volumen disponible, suavizan los gradientes de velocidad

y eliminan zonas muertas. Este comportamiento concuerda con los análisis experimentales y numéricos de sistemas dual-impulsor reportados por otros investigadores (Micale *et al.*, 1999; Montante *et al.*, 2001), donde se constató una distribución de energía más homogénea y tiempos de mezcla significativamente menores.

El beneficio se observa con nitidez en los tres puntos de muestreo señalados. En el punto inferior (zona de alta cizalla), la velocidad pasa de 0.0228 m/s con un impulsor a 0.0194 m/s con dos impulsores (-15 %), sin comprometer la magnitud de la cizalla, pero introduciendo nuevos gradientes de velocidad que favorecen la dispersión. En la región media, la instalación del segundo impulsor eleva la velocidad de 0.006 m/s a 0.0253 m/s (+300 %), conectando dinámicamente las celdas superior e inferior y reduciendo el tiempo característico de circulación. En la parte superior del tanque la velocidad pasa de 0.0140 m/s a 0.0431 m/s (+200 %), suprimiendo la estratificación e incrementando el Reynolds local, condición imprescindible para un régimen plenamente turbulento.

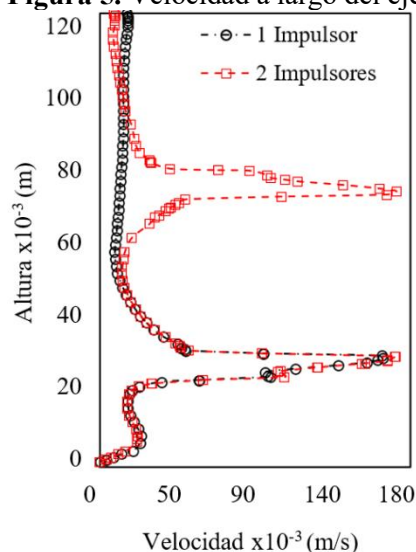
Este incremento global de la energía cinética se traduce en tiempos de mezcla más cortos y en un número de Reynolds efectivo mayor, lo que acelera los fenómenos de disolución, suspensión y transferencia de calor. Estudios muestran que, bajo igual potencia específica, una cobertura más uniforme de velocidades turbulentas reduce el índice de segregación e incrementa la eficiencia de macro-mezclado (Buwa *et al.*, 2006). Aunque añadir un impulsor implica un aumento de potencia ($P \propto N^3 D^5$), la literatura coincide en que el costo energético adicional se compensa con la reducción del tiempo de operación y la mejora del rendimiento de proceso, sobre todo en tanques altos o fluidos de viscosidad media-alta (Buwa *et al.*, 2006; Sahu *et al.*, 1999).

El perfil de velocidades obtenido a partir de la línea vertical situada en $r=0.013$ m (Figura 5), evidencia de forma cuantitativa la influencia que ejerce el número de rotores sobre la hidrodinámica del tanque. Con un solo impulsor, el flujo adopta una forma campaniforme muy marcada, la energía cinética se concentra casi exclusivamente en torno al plano del rotor y decrece con rapidez tanto hacia el fondo como hacia la tapa del tanque. En $z=\pm 0.02$ m la velocidad cae por debajo de 0.05 m/s y en $z=\pm 0.06$ m, apenas supera 0.02 m/s, lo que anticipa zonas de mezcla deficiente, propensas a estratificación térmica o composicional. Al instalar un segundo impulsor, el perfil se transforma en una doble campana con los picos bien definidos, uno a la altura del rotor inferior y otro en el entorno del rotor central, ambos

alcanzan una velocidad máxima aproximada de 0.18 m/s. Dichas zonas de alta energía cinética desarrollan una franja de 0.06-0.12 m/s que prueban la conexión hidrodinámica de las celdas de recirculación y la atenuación de los gradientes axiales de velocidad. En la región inferior ambos arreglos mantienen velocidades uniformes, aunque se aprecia un ligero descenso local de cizalla con respecto al impulsor único. El barrido producido por el chorro ascendente del segundo rotor mejora la renovación de fluido en la parte media del cilindro. En la parte superior, donde el impulsor único generaba valores prácticamente nulos, el segundo rotor introduce una columna ascendente de 0.05-0.07 m/s que rompe la estratificación (Figura 4b).

Este comportamiento produce tiempos de mezcla marcadamente menores, suspensión más efectiva de sólidos y un número de Reynolds local más alto, condiciones indispensables para acelerar procesos de disolución, reacción o transferencia de calor. Aunque el consumo específico de potencia aumenta al añadir el segundo impulsor, la eficiencia global de mezcla expresada como el producto del tiempo de mezcla por la potencia volumétrica tiende a mejorar, compensando el gasto energético adicional.

Figura 5. Velocidad a largo del eje z para 1 y 2 impulsores



El trazado radial de la velocidad (Figura 6) y de la energía cinética específica de turbulencia (Figura 7) confirma con resolución local, la ventaja de emplear la configuración de dos impulsores (2A) frente a la de uno solo (1A), tanto en la línea superior de análisis como en la inferior.

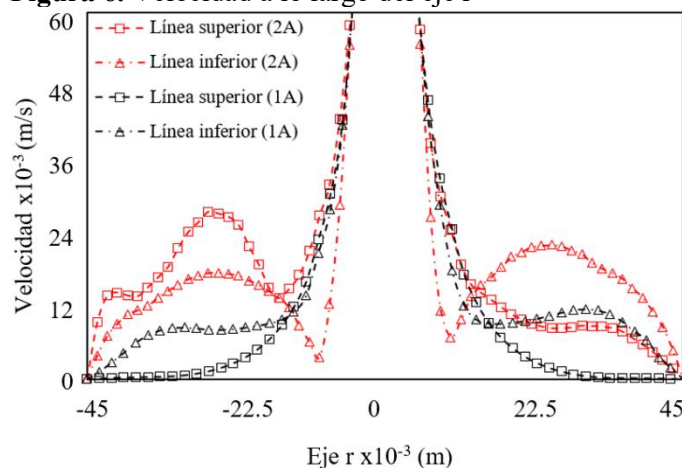
Para el caso de la velocidad en la línea inferior, el perfil con un único impulsor muestra un pico angosto cerca del eje de rotación ($r \approx 0.005$ m) asociado al chorro axial ascendente y un descenso casi

exponencial hacia las paredes, de modo que en $|r| > 0.02$ m la magnitud cae por debajo de 0.012 m/s.

En contraparte, para la configuración de dos impulsores (2A) en la misma línea inferior, los rotores siguen generando el pico central, pero el chorro descendente procedente del impulsor superior incide sobre esta sección y crea una campana amplia ($0.01 \text{ m} < r < 0.045 \text{ m}$) cuyas velocidades son cercanas a los 0.024 m/s, duplicando las obtenidas con un solo impulsor ($\leq 0.012 \text{ m/s}$). Este efecto lateral fortalece la corriente de retorno hacia las palas y evita la formación de zonas muertas próximas al fondo y a los deflectores.

Para la línea superior, se obtuvieron valores promedio de 0.009 m/s y 0.017 m/s con uno y dos impulsores, respectivamente. También se observa que el perfil de velocidades con un solo impulsor presenta un comportamiento simétrico respecto a las dos líneas de análisis. En contraste, la incorporación del segundo impulsor rompe dicha simetría y genera un perfil con mayores fluctuaciones locales, lo cual es atribuible al incremento en la intensidad de la turbulencia.

Figura 6. Velocidad a lo largo del eje r

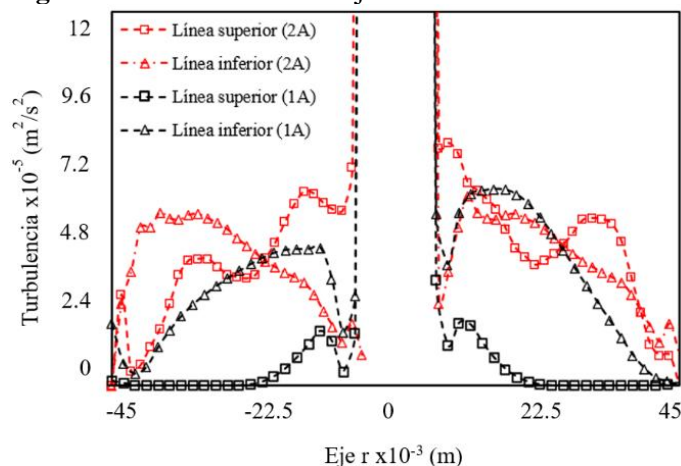


Por otro lado, la energía cinética específica de turbulencia (Figura 7), presenta un comportamiento altamente fluctuante e irregular en la mayoría de los escenarios, exceptuando el análisis de la línea superior con un solo impulsor (1A), donde la turbulencia es casi despreciable.

Con un solo impulsor y en la línea inferior, la energía cinética específica de turbulencia genera una campana asimétrica con valores máximos promedio cercanos a $k \approx 5.10 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$. En cambio, la configuración de dos impulsores eleva k por encima de $6.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Por su parte, en la línea superior con dos impulsores se registró un valor promedio de $\bar{k} = 6.97 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$. Estos resultados demuestran que la interacción de ambos chorros amplifica la cizalla y el gradiente en regiones que previamente estaban dominadas por un flujo casi laminar.

Figura 7. Turbulencia en el eje radial r



CONCLUSIONES

Los resultados numéricos y su interpretación evidencian con claridad que el desempeño hidrodinámico de un tanque cilíndrico agitado depende de manera importante del número y la disposición de los impulsores. El esquema tradicional de un solo rotor genera un chorro axial intenso que, si bien proporciona velocidades elevadas en su entorno inmediato, deja rápidamente zonas de flujo lento en la mitad superior y junto a las paredes. El perfil axial exhibe una distribución acampanada: las velocidades superan 0.05 m/s únicamente en una banda estrecha cercana a $z = \pm 0.02 \text{ m}$ (alrededor del plano horizontal del impulsor) y caen por debajo de 0.02 m/s tanto en el fondo como cerca de la tapa del tanque. Este patrón predispone a la estratificación térmica o composicional y al riesgo de sedimentación en recipientes altos.

La introducción de un segundo impulsor, colocado aproximadamente a dos tercios de la altura total del tanque, transforma la dinámica interna. Se forman dos celdas de recirculación cuyas zonas de alta velocidad se superponen y extienden la cobertura turbulenta a prácticamente todo el volumen. El perfil axial adopta una configuración de doble campana con picos de hasta 0.18 m/s y una franja intermedia con velocidades cercanas a 0.12 m/s, lo que confirma una redistribución homogénea de la energía cinética.

En los análisis radiales con doble impulsor (líneas superior e inferior) se observan zonas con velocidades

de magnitud importante y, sobre todo, incrementos de la turbulencia específica (k) de hasta un orden de magnitud respecto al diseño de un solo impulsor. Esta mayor turbulencia promueve cizallas locales más altas, favorece la suspensión de sólidos y mejora los coeficientes de transferencia de calor y masa, particularmente cerca de las paredes del tanque.

La configuración de dos impulsores reduce de forma significativa el tiempo de mezcla macroscópica, minimiza la segregación y elimina zonas muertas tanto en la parte alta como en la baja del recipiente. Para procesos que demanden homogeneidad rápida y uniforme (reactores batch, suspensión de partículas densas, formulaciones viscosas o sistemas con transferencia de calor limitada), el arreglo dual se destaca como la opción más robusta. El esquema de un solo impulsor sigue siendo válido en fluidos de baja viscosidad y cuando la limitación energética sea determinante, pero conviene complementarlo con baffles apropiados y límites de altura/diámetros moderados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achouri, R., Mokni, I., Mhiri, H & Bournot, P. A. (2012) *3D CFD simulation of a self inducing pitched blade turbine downflow*. Energy Conversion and Management. (64) 633-641.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.06.005>
- Ameur, H. (2016) *Mixing of complex fluids with flat and pitched bladed impellers: Effect of blade attack angle and shear-thinning behaviour*. Food and bioproducts processing. (99) 71-77.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.04.004>
- Buwa, V., Dewan, A., Nassar, A. F., Durst, F. (2006) *Fluid dynamics and mixing of single-phase flow in a stirred vessel with a grid disc impeller: Experimental and numerical investigations*. Chemical Engineering Science. (61) 2815-2822. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.10.066>
- Chambergo, J. C., Valverde, Q., Pachas, A & Yépez, H. (2017) *Estudio del comportamiento Fluido-Dinámico de un agitador a escala reducida mediante simulación numérica*. Información tecnológica. (28) 37-46. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000300005>
- Foukrach, M., Bouzit, M., Ameur, H., Kamla, Y. (2020) *Effect of Agitator's Types on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank*. Chinese Journal of Mechanical Engineering. (1) 33-37.
<https://doi.org/10.1186/s10033-020-00454-2>



- Iranshahi, A., Devals, C., Heniche, M., Fradette, L., Tanguy, P. A., Takenaka, K. (2007) *Hydrodynamics characterization of the Maxblend impeller*. Chemical Engineering Science. (62) 3641-3653. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.03.031>
- Landau., Lifshitz. (1982) *Fluids Mechanics*. Vol. 6, Pergamon Press.
- Major Godlewska, M., Karcz, J. (2018) *An effect of the tubular baffles configuration in an agitated vessel with a high-speed impeller on the power consumption*. Chemical Papers. (72) 2933-2943. <https://doi.org/10.1007/s11696-018-0533-4>
- Menter, F., Kuntz, M., Langtry, R. (2003) *Ten years of industrial experience with the SST turbulence model*. Turbulence, heat and mass transfer. (4) 625-632.
- Micale, G., Brucato, Grisafi F., Ciofalo, M. (1999) *Prediction of flow fields in a dual-impeller stirred vessel*. American Institute of Chemical Engineers Journal. (45) 445-464. <https://doi.org/10.1002/aic.690450303>
- Montante, G., Lee, K.C., Brucato, A., Yianneskis, M. (2001) *Numerical simulations of the dependency of flow patterns on impeller clearance in stirred vessels*. Chemical Engineering Science. (56) 3751-3770. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00089-6)
- Pao, H-P. (1972) *Numerical solution of the Navier Stokes equations for flows in the disk-cylinder system*. Phys. Fluids, (15) 4-11. <https://doi.org/10.1063/1.1693752>
- Rozo, J. S. (2020) *Propuesta de diseño estructural de un tanque agitador vertical para la mezcla debiofertilizante*. Universidad Antonio Nariño, Colombia.
- Sahu, A. K., Kumar, P., Patwardhan, A. W., Joshi, J. B. (1999) *CFD modelling and mixing in stirred tanks*. Chemical Engineering Science. (54) 2285-2293. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00334-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00334-0)
- Sen, Q., Shenganan, L., Muk, C. (2021) *An evaluation of different RANS turbulence models for simulating braking waves past a vertical cylinder*. Ocean Engineering. (234) 109195. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109195>
- Silva Rosa, V. D., Santos Taqueda, M. E., Paiva, J. L., Moraes, M. S., Morales Júnior, D. (2017) *Nusselt's correlations in agitated tanks using the spiral coil with Rushton turbine and PBT 45*



- impeller. Comparison with tanks containing vertical tube baffles.* Applied Thermal Engineering. (110) 1331-1342. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.035>
- Tijonov, A. N., Samarsky, A. A. (1980) *Ecuaciones de la física matemática*. Edit. MIR, Moscú. 1-29.
- Venneker Bart, C. H., Derksen, J. J., Van den Akker Harry, E. A. (2010) *Turbulent flow of shear-thinning liquids in stirred tanks. The effects of Reynolds number and flow index.* Chemical Engineering Research and Desing. (88) 827-843. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.01.002>
- Yu, P., Lee, T. S., Zeng, Y., Low, H. T. (2007) *Characterization of flow behavior in an enclosed cylinder with a partially rotating end wall.* Physics of fluids. (19) 057104. <https://doi.org/10.1063/1.2731420>