Casa abierta al tiempo

Universidad Autónoma Metropolitana

Azcapotzalco

**Análisis de patrones turbulentos de un tanque agitado,
utilizando dinámica de fluidos computacional y velocimetría
por imágenes de partículas**

Tesis

**Para obtener el grado de
Doctor en Ingeniería de Procesos**

Presenta:

M. C. Israel Gonzalez Neria

Director de tesis

Dr. Sergio Alejandro Martínez Delgadillo

Codirector de tesis

Dr. Alejandro Alonzo García

Agradecimientos

A mi padre, madre y hermano

A mis abuelos, tíos, primos y a toda la familia

A los amigos

A los compañeros

A los profesores

A mis asesores

Gracias por el apoyo, confianza, alegrías, sonrisas, entendimiento y por todos los momentos que me han compartido conmigo a lo largo del camino.

Resumen

En la presente investigación se analizó la hidrodinámica del fluido que se encuentra dentro de un tanque de agitación, el cual fluye debido a la energía que es transferida por un impulsor de flujo axial. Teniendo especial interés en los patrones turbulentos derivados de la generación de la energía cinética turbulenta y de su tasa de disipación. Así como su variación al modificar las superficies de un impulsor de 4 paletas inclinadas a 45°, al utilizar surcos en forma de U y V.

Se realizaron mediciones de los campos de velocidad con la técnica de la velocimetría por imágenes de partículas en diferentes planos, con el objetivo de aplicar la metodología de la resolución angular. El sistema consta de un láser de doble pulso con una longitud de onda de 532nm y 75mJ. Una cámara con una resolución de 2360 X 1776 pixeles y una frecuencia de 16 tomas por segundo.

El tanque de agitación empleado es de acrílico con un diámetro de 25cm (T), con cuatro deflectores de un espesor de 3mm y un ancho de 2.5cm, montados en las paredes internas de forma equidistante. El impulsor se colocó de forma concéntrica a una altura del fondo del tanque igual a $C = 1/3T$. El fluido de trabajo es agua y se emplean alrededor de 12 litros para llenar el tanque a una altura de 25cm (H).

Además, se utilizó el programa comercial ANSYS® Fluent®, para realizar una simulación de los grandes remolinos, con el fin de investigar la afinidad de estos resultados con los obtenidos de forma experimental.

La implementación de los surcos en las superficies de las paletas condujo a una reducción del número de potencia y del número de bombeo, sumado a esto, se modificaron las distribuciones de la tasa de disipación y de energía cinética turbulenta.

Abstract

In the present investigation, the hydrodynamic behavior in the stirring tank was analyzed. Taking a special interest in the turbulent patterns derived from the generation of turbulent kinetic energy and its dissipation rate. As well as its variation when modifying the surfaces of a 45° pitched 4 blade turbine, when using U and V grooves.

Measurements of the velocity fields were carried out with the technique of particle image velocimetry in different planes, with the aim of applying the methodology of angle resolved. The system consists of a double pulse laser with a wavelength of 532nm and 75mJ, a camera with a resolution of 2360 X 1776 pixels and a frequency of 16 frames per second.

The agitation tank used is made of acrylic with a diameter of 25cm (T), with four baffles 3mm thick and 2.5cm wide, mounted equidistant on the internal walls. The impeller was placed concentrically at a height from the bottom of the tank equal to $C = 1/3T$. The working fluid is water and about 12 liters are used to fill the tank to a height of 25cm (H).

In addition, the commercial software ANSYS® Fluent® was used to implement the Large Eddy Simulation, in order to investigate the affinity of these results with those obtained experimentally.

The implementation of the grooves on the surfaces of the blades led to a reduction in the power number and the pumping number. Furthermore, the distributions of the dissipation rate and of turbulent kinetic energy were modified.

Índice

	Página
Resumen	
Abstract	
Lista de figuras	I
Lista de tablas	IV
Nomenclatura	V
Letras griegas	VI
Capítulo 1.- Introducción	1
1.1.- Motivación	1
1.2.- Planteamiento del problema	2
1.3.- Justificación	3
1.4.- Hipótesis	3
1.5.- Objetivo general	3
1.6.- Objetivos particulares	4
Capítulo 2.- Estado del arte	5
2.1.- Tanque de agitación	5
2.2.- Investigaciones del tanque de agitación	15
Capítulo 3.- Desarrollo experimental	28
3.1.- Velocimetría por imágenes de partículas bidimensional	28
3.1.1.- Equipo experimenta	30
3.2.- Medición del torque	33
3.3.- Cálculo de parámetros turbulentos	34
3.3.1.- Energía cinética turbulenta y tasa de disipación	34
3.3.2.- Número de potencia, número de bombeo y eficiencia de bombeo	39

Capítulo 4.- Desarrollo numérico	41
4.1.- Simulación numérica	41
4.2.- Simulación de los grandes remolinos	43
4.3.- Metodología numérica	47
4.3.1.-Energía cinética turbulenta y tasa de disipación	50
4.4.- Estudio de la independencia de la malla	50
 Capítulo 5.- Resultados	 55
5.1.- Comparación entre resultados experimentales y numéricos	55
5.1.1.- Número de potencia, número de bombeo y eficiencia de bombeo	55
5.1.2.- Campos de velocidad	58
5.1.3.- Energía cinética turbulenta	60
5.1.4.- Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta	64
5.2.- Comparación de los resultados de la técnica PIV entre impulsores	67
5.3.- Mediciones adicionales	71
5.4.- Conclusiones	79
 Productos	 81
Recomendaciones para futuros trabajos	85
Referencias	86
Apéndice	96

Lista de figuras

Figura	Título	Página
2.1	Tipos de perfiles del fondo del tanque de agitación – (a) plano, (b) elipsoidal, (c) cóncavo, (d) con contorno, (e) con cono y chaflán y (f) cónico [10].	6
2.2	Uso de múltiples impulsores [9].	6
2.3	Separación entre impulsores (S).	8
2.4	Efecto de S en los patrones de flujo - (a) $S/D < 0.5$ (b) $0.5 < S/D < 1.5$ y (c) $S/D > 2$ [13].	8
2.5	Efecto de C en los patrones de flujo - (a) $C = 1/3T$ y (b) $C = 1/8T$ [14].	9
2.6	Efecto de los deflectores en el patrón de flujo – tanque de agitación (a) sin deflectores y (b) con deflectores [15].	10
2.7	Geometrías utilizadas en los deflectores [6].	10
2.8	Impulsor no concéntrico – (a) con excentricidad de $T/6$ y (b) con una inclinación de 10° - 15° [15].	11
2.9	Agitación lateral del tanque [8].	11
2.10	Impulsor de flujo (a) axial, (b) radial y (c) mixto [16].	12
2.11	Rangos de viscosidad para diferentes impulsores [10].	13
2.12	Características para diferentes impulsores con respecto a la generación de turbulencia y el bombeo de líquido [10].	15
2.13	Energía cinética turbulenta para el impulsor con una inclinación de las paletas de (a) 45° , (b) 60° y (c) 75° [20].	17
2.14	Concentración de Rodamina B [21].	18
2.15	Tasa de disipación específica para el impulsor (a) con bombeo ascendente y (b) con bombeo descendente [22].	20
2.16	Tasa de disipación específica para el impulsor (a) de paletas planas y (b) de fractales [42].	21
2.17	Vectores de velocidad para el impulsor (a) concéntrico, (b) con $e = 0.2$, (c) con $e = 0.3$ y (d) con $e = 0.5$ [43].	23
2.18	Impulsor (a) m-PBT20, (b) m-PBT30, (c) m-PBT40 (d) m-PBT45, (e) PBT45-3 y (f) PBT45-4 [64].	24
2.19	Distribución de la velocidad promedio para el impulsor m-PBT40 obtenida mediante la técnica (a) PIV y (b) RANS [64].	24

2.20	Energía cinética turbulenta adimensional – configuración (a) FR/HUW/ κ - ϵ , (b) CA/HUW/ κ - ϵ , (c) SM/HUW/ κ - ϵ , (d) FR/UW/ κ - ϵ , (e) FR/QDS/ κ - ϵ , (f) FR/HUW/RNG y (g) LDV [52].	27
3.1	Imagen de partículas [89].	29
3.2	Tanque de agitación.	30
3.3	Esquema del tanque de agitación.	31
3.4	Impulsor (a) PBT, (b) U y (c) V.	31
3.5	Descripción geometría del impulsor (a) PBT, (b) U y (c) V [90].	32
3.6	Componentes del PIV [91].	32
3.7	Área de análisis.	34
3.8	Energía cinética turbulenta normalizada obtenida con (a) dos componentes de velocidad y (b) con tres componentes de velocidad [34].	35
3.9	Tasa de disipación obtenida mediante (a) evaluación directa, (b) análisis dimensional y (c) evaluación LES [22].	36
3.10	Variación de C_s (—), $C_{s\infty}$ (···), C_{s1} (—) y C_{a1} (--) - donde Δ/Δ' de $\frac{1}{2}$ (X), $\frac{3}{4}$ ($\triangleleft$) y 0.95 ($\circ$) [108].	38
3.11	Planos de análisis.	39
4.1	Distribución de energía.	44
4.2	Discretización espacial del impulsor.	47
4.3	Zonas múltiples de referencia [121].	48
5.1	Número de potencia.	55
5.2	Número de bombeo.	56
5.3	Eficiencia de bombeo.	57
5.4	Velocidad axial – resultados experimentales y numéricos en el plano a 60°.	59
5.5	Velocidad axial - (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° y (d) 45° [22].	60
5.6	Energía cinética turbulenta – resultados experimentales y numéricos en el plano a 60°.	61
5.7	Distribución de la energía cinética turbulenta en el plano a 60° utilizando diferentes escalas.	62
5.8	Energía cinética turbulenta – (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° y (d) 45° [22].	63
5.9	Tasa de disipación – resultados experimentales y numéricos en el plano a 60°.	65

5.10	Distribución de la tasa de disipación en el plano a 60° utilizando diferentes escalas.	66
5.11	Tasa de disipación – (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° y (d) 45° [22].	67
5.12	Velocidad axial - PIV.	68
5.13	Energía cinética turbulenta - PIV.	70
5.14	Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta - PIV.	71
5.15	Vorticidad en los planos 0°, 15° y 30° [90].	72
5.16	Vorticidad en los planos 45°, 60° y 75° [90].	73
5.17	Contornos de los vórtices - criterio λ_2 ($\lambda_2 = -400\text{s}^{-2}$) [90].	74
5.18	Localización de los planos MP y TP [146].	75
5.19	Medición con diferente posicionamiento del láser, a) dirección 1 y b) dirección 2 [146].	75
5.20	Velocidad axial en el plano MP y TP [146].	76
5.21	Vorticidad en el plano MP y TP [146].	77

Lista de tablas

Tabla	Título	Página
2.1	Número de impulsores [11].	7
2.2	Número de impulsores y su posición respecto al fondo del tanque [1].	7
2.3	Impulsores y patrones de flujo [17].	14
2.4	Estudios experimentales del tanque de agitación.	19
2.5	Estudios numéricos del tanque de agitación.	22
2.6	Estudios experimentales y numéricos del tanque de agitación.	25
3.1	Características de las partículas trazadoras [88].	29
4.1	Constantes del modelo de turbulencia κ - ϵ realizable [115].	43
4.2	Tamaño de las mallas.	51
4.3	Características de las mallas.	54
5.1	Comparación de resultados con los resultados de otros investigadores.	57

Nomenclatura

Símbolo	Nombre	Unidades
A	constante de proporcionalidad	-
C	distancia del fondo del tanque al impulsor inferior	cm
	constante de submalla	-
C_1	constante del modelo de turbulencia κ - ε realizable	-
C_2	constante del modelo de turbulencia κ - ε realizable	-
C_s	constante de Smagorinsky	-
D	diámetro del impulsor	cm
	dominio del fluido	-
d_w	distancia de la pared	-
e	excentricidad del impulsor	cm
	error relativo	-
G	función de filtrado	-
H	altura del líquido	cm
h_i	tamaño representativo de cada una de las mallas	-
L_s	longitud de mezcla a escala de submalla	-
N	revoluciones por segundo	rps
	número de elementos del dominio computacional	-
η_e	eficiencia de bombeo	-
N_p	número de potencia	-
N_q	número de bombeo	-
p	orden aparente del esquema	-
Q	flujo másico	kg/s
r	distancia del centro del impulsor a un punto de medición	cm
	factor de refinamiento de la malla	-
R	radio del impulsor	cm
	condición de convergencia aparente	-
Re	número de Reynolds	-
S	espacio entre impulsores	cm
	constante del modelo de turbulencia κ - ε realizable	-
	tasa de deformación	-
	parte simétrica del tensor del gradiente de velocidad	-
$\bar{S}_{ij}$	tensor de la tasa de deformación resuelto	-
T	diámetro del tanque de agitación	cm
$\dot{T}$	torque	N-m

u	componente puntual de la velocidad	m/s
	componente de la velocidad en la coordenada x	m/s
u'	componente fluctuante de la velocidad	m/s
u''	componente fluctuante verdadera de la velocidad	m/s
$\bar{u}$	componente promedio de la velocidad	m/s
$\bar{u} \theta$	componente promedio de la velocidad para una posición determinada	m/s
v	componente de la velocidad en la coordenada y	m/s
V	volumen de la celda computacional	cm ³
V_{axi}	velocidad axial	m/s
V_{punta}	velocidad en la punta del impulsor PBT	m/s
V_{rad}	velocidad radial	m/s
W	ancho de la paleta	cm
w	componente de la velocidad en la coordenada z	m/s
x^+	coordenada adimensional en la dirección del flujo	-
y^+	coordenada adimensional en la dirección perpendicular a la pared del dominio computacional	-
z^+	coordenada adimensional en la dirección perpendicular al flujo	-

Letras griegas

Símbolo	Nombre	Unidades
α	ángulo de divergencia	°
β	ángulo de la pared exterior del impulsor	°
Δ	resolución espacial, raíz cubica del volumen de la celda	μm
Δt	paso temporal	s
ΔV_i	volumen	cm ³
Δx	tamaño de la celda	cm
$\Delta \theta$	tamaño de la celda en coordenadas cilíndricas	°
ε	tasa de disipación de la energía cinética turbulenta	m ² /s ³
η	escala de Kolmogorov	-
	constante del modelo de turbulencia κ-ε realizable	-
θ	ángulo de posicionamiento del impulsor	°
k	energía cinética turbulenta	m ² /s ²
Λ	escala de longitud integral	-

λ_2	segundo eigenvalor	s^{-2}
μ	viscosidad dinámica	$Kg/(m \cdot s)$
μ_t	viscosidad turbulenta a escala de submalla	$Kg/(m \cdot s)$
ν	viscosidad cinemática	m^2/s
ν_{tur}	viscosidad cinemática	m^2/s
ρ	densidad	Kg/m^3
σ	número de Prandtl turbulento	-
σ_ϵ	constante del modelo de turbulencia κ - ϵ realizable	-
σ_k	constante del modelo de turbulencia κ - ϵ realizable	-
τ_{ij}	tensor de submalla	-
ϕ	variable de interés	-
$\bar{\phi}$	variable filtrada	-
ω_z	vorticidad	-
Ω	parte antisimétrica del tensor del gradiente de velocidad	-
ω_{rot}	frecuencia de paso de la paleta	Hz

Capítulo 1

Introducción

1.1.- Motivación

Uno de los equipos ampliamente utilizado en la ingeniería de procesos es el tanque de agitación, derivado de la factibilidad en su construcción, fácil instalación, robustez, flexibilidad del sistema, la buena calidad de los productos generados y su relativo bajo costo de operación [1]–[3].

Algunas de las industrias que lo emplean son la de gas, papel, química, aguas residuales, pinturas, recubrimientos, generadora de energía, comida, bebidas, agroquímica, farmacéutica, petroquímica, biotecnológica, polímeros, automotriz, cosméticos y minera entre otras [4]–[9].

Teniendo la finalidad de llevar a cabo la homogenización de una mezcla, la dispersión de gases en un líquido, la suspensión y distribución de un sólido en un líquido, la dispersión de líquidos, la transferencia de calor o alguna reacción química [1]–[3].

La reducción de los costos de operación siempre ha generado un interés dentro de cualquier proceso que se realiza en la industria. En el caso del tanque de agitación se relaciona con la producción de una sustancia requerida con ciertas características, evitando la obtención de productos no deseados y las fallas relacionadas con el funcionamiento del sistema [1]–[3]. Una forma de lograr esta reducción es mediante la investigación del comportamiento hidrodinámico de las sustancias que se encuentran dentro del tanque. Teniendo hoy en día la posibilidad de obtener información de las características del proceso en diferentes zonas del sistema [1], [2].

Esto ha conducido a empresas como Philadelphia Mixing Solutions and Mixing Solutions Limited, EKATO, Feda, Pfaudler, De Dietrich Process Systems, Dynamix y M Y V MIXING al desarrollo de impulsores que garanticen que el proceso se realice de una forma adecuada [4]–[9].

Dando como resultado la reducción de la energía requerida, el incremento de la velocidad del flujo de descarga, la reducción de las zonas de baja velocidad y la reducción del tiempo de mezclado, por mencionar algunos ejemplos, los cuales conducen a la reducción de los costos de operación en diferentes industrias [4]–[9].

De acuerdo a lo antes mencionado, el estudio de nuevos impulsores es un campo de oportunidad, derivado de los grandes beneficios que pueden aportar en la mejora de algún proceso, al reducir el consumo de energía o al incrementar la calidad del producto por mencionar algunos.

En la presente investigación se utiliza el impulsor de cuatro paletas inclinadas como geometría base, ya que este se emplea en el laboratorio de Sistemas de Procesos Acuáticos, para realizar investigaciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales, sumado a este, se cuenta con otros que han sido modificados geométricamente y de los cuales no se tiene ninguna información de su desempeño.

1.2.- Planteamiento del problema

El impulsor de cuatro paletas inclinadas, es ampliamente utilizado en la industria para llevar a cabo diversos procesos, lo que ha producido un gran interés a lo largo del tiempo para investigar el comportamiento hidrodinámico que genera en el tanque de agitación.

Estas investigaciones están relacionadas con variaciones de la geometría del impulsor, de su posicionamiento o su tamaño, por mencionar algunas, con la finalidad de reducir la energía que consume e incrementar la cantidad de flujo que bombea.

Sin embargo, de acuerdo al conocimiento del autor no existen investigaciones que se enfoquen en la distribución de la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación, como variables claves que direccionen el cambio de su geometría, aun cuando estas variables han sido relacionadas con el macromezclado y el micromezclado.

Es por esto que se plantea investigar los efectos que tiene la modificación de la paleta en estos parámetros en particular, realizando dichas modificaciones mediante la implementación de surcos en forma de U y V.

Sumado a esto, se plantea evaluar la afinidad de los resultados obtenidos a través de la simulación de los grandes remolinos, respecto a los obtenidos mediante velocimetría por imágenes de partícula.

1.3.- Justificación

Se estudiarán los efectos que tienen los surcos de las paletas en forma de U y V, sobre los patrones de la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación, mediante la técnica de velocimetría por imágenes de partículas.

Sumado a esto, se empleará la simulación de los grandes remolinos con la finalidad de observar la similitud entre los resultados numéricos y los experimentales, para determinar la factibilidad de su implementación en investigaciones subsecuentes.

De esta forma se incrementará el conocimiento vinculado con los tanques de agitación, debido a la inexistencia de información relacionada con esta modificación geométrica, aplicada en un impulsor de cuatro paletas inclinadas.

1.4.- Hipótesis

La modificación de las paletas del impulsor de cuatro paletas inclinadas al implementar surcos en forma de U y V, conducirá a la alteración de los patrones de energía cinética turbulenta y de su tasa de disipación, sumado a esto, su estimación mediante la técnica de la simulación de los grandes remolinos tendrá una buena similitud con la distribución obtenida a través de la velocimetría por imágenes de partículas.

1.5.- Objetivo general

Caracterizar el comportamiento de los patrones turbulentos que se generan dentro de un tanque agitado, al utilizar impulsores con surcos en forma de U y V en las paletas, utilizando la simulación de los grandes remolinos y la velocimetría por imágenes de partículas.

1.6.- Objetivos particulares

- Crear una base de datos de los campos de velocidad implementando la velocimetría por imágenes de partículas.
- Calcular la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación a partir de la información experimental.
- Implementar la simulación de los grandes remolinos.
- Evaluar la afinidad de los resultados numéricos con base en los datos experimentales.
- Evaluar la modificación de los patrones turbulentos de las nuevas geometrías.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1.- Tanque de agitación

El tanque de agitación se emplea en la industria del gas, papel, química, aguas residuales, pinturas, recubrimientos, comida, bebidas, agroquímica, farmacéutica, petroquímica, biotecnológica, polímeros, automotriz, cosméticos y minera entre otras, con el objetivo de obtener un determinado producto de acuerdo al proceso que se realiza en su interior [4]–[9].

De esta forma al agitar dos líquidos miscibles se puede obtener una mezcla homogénea o una solución, en el caso de líquidos inmiscibles se puede llevar a cabo un proceso de catálisis, alquilación o emulsificación [1]–[3]. La dispersión de un sólido en un líquido se utiliza en procesos de polimerización, cristalización, producción de pulpa de papel, lixiviación de lodos, suspensión o disolución [1]–[3]. La dispersión de gases en un líquido se utiliza en procesos de absorción, lavado de gases, cloración, tratamiento de aguas residuales, oxidación, hidrogenación o fermentación [1]–[3].

Para realizar de forma eficiente cada uno de los procesos que requiere la industria, se recurre a diferentes configuraciones del tanque de agitación. En el caso de la forma geométrica de este, se pueden encontrar tanque cilíndricos verticales u horizontales, así como tanques rectangulares [2].

Por otra parte, en la Figura 2.1 se presentan diferentes perfiles del fondo, siendo estos plano, cóncavo, elipsoidal, con cono, con chaflan, cónico y con contorno [1], [3], [10]. En el caso de los bordes redondeados, estos contribuyen a la reducción de la formación de zonas de baja velocidad en esta área.

Por su parte, el fondo cóncavo, elipsoidal, con cono, con chaflan y con contorno contribuyen a mejorar la suspensión de partículas sólidas, mientras que el fondo cónico es de utilidad cuando se desea realizar el asentamiento de estas [10].

Figura 2.1.- Tipos de perfiles del fondo del tanque de agitación – (a) plano, (b) elipsoidal, (c) cóncavo, (d) con contorno, (e) con cono y chaflan y (f) cónico [10].

La altura del líquido (**H**) es otro factor a considerar, debido a su influencia en el número de impulsores que se requieren utilizar para garantizar su flujo a lo largo de todo el tanque. En la Figura 2.2, se ejemplifican dos sistemas en los que se hace necesario la implementación de múltiples impulsores, como consecuencia de la altura que manejan.

Figura 2.2.- Uso de múltiples impulsores [9].

Para determinar el número de impulsores requeridos existen diferentes criterios. En la Tabla 2.1 se tomaron en cuenta la relación entre la altura del líquido y el diámetro del tanque (**H/T**), el tipo de impulsor y el número de Reynolds (**Re**), para establecer un rango en el que se aconseja utilizar 1 o 2 impulsores.

Tabla 2.1.- Número de impulsores [11].

Máximo valor H/T						
Re \ No. Impulsores	Impulsor de alta eficiencia		Impulsor de 4 paletas inclinadas a 45°		Impulsor de 4 paletas planas o de disco con 6 paletas	
	1	2	1	2	1	2
10 – 100	0.9	1.7	0.8	1.5	0.6	1.2
100 – 1000	1.3	2.1	0.9	1.6	0.6	1.2
1000 – 10000	1.4	2.3	1.1	1.8	0.7	1.4
>10000	1.5	2.4	1.2	1.9	0.8	1.6

En cambio, en la Tabla 2.2 se considera la relación **H/T** y las fases presentes en el sistema de mezclado, para proponer el número de impulsores que el tanque debe utilizar, además de la posición que estos deben de tener con respecto al fondo del tanque.

Tabla 2.2.- Número de impulsores y su posición respecto al fondo del tanque [1].

Sistema de mezclado	H/T máximo	No. de impulsores	Posición del impulsor respecto del fondo	
			inferior	superior
Mezcla de líquidos	1.4	1	H/3	-
	2.1	2	T/3	2H/3
Suspensión de sólidos	1.2	1	H/4	-
	1.8	2	T/4	2H/3
Dispersión de gases	1.0	1	T/6	-
	1.8	2	T/6	2H/3

Cuando se tiene más de un impulsor, el espacio que existe entre estos (**S**), Figura 2.3, se convierte en un parámetro a considerar, debido a su estrecha relación con el número de potencia (**Np**), ya que se ha reportado un incremento de este parámetro cuando se amplía la distancia **S** entre dos turbinas Rushton [12].

Figura 2.3.- Separación entre impulsores (**S**).

Por otra parte, **S** también afecta los patrones de flujo que se desarrollan dentro del tanque, en la Figura 2.4 se presenta una variación de estos con base en la relación de la distancia entre impulsores y el diámetro de estos (**S/D**). Teniendo para una relación **S/D** < 0.5 la creación de un solo patrón de flujo, correspondiente a un impulsor con paletas más anchas, para $0.5 < \mathbf{S/D} < 1.5$ los patrones de flujo creados por cada impulsor tienden a interactuar entre ellos, y para **S/D** > 2 no se presentara una interacción entre estos [13].

Figura 2.4.- Efecto de **S** en los patrones de flujo - (a) **S/D** < 0.5
(b) $0.5 < \mathbf{S/D} < 1.5$ y (c) **S/D** > 2 [13].

Cabe mencionar que la distancia del fondo del tanque al impulsor inferior (**C**), es otro parámetro a considerar en su funcionamiento, debido a la influencia que tiene sobre los patrones de flujo que se generan dentro de este, como se observa en la Figura 2.5.

Donde para $C = 1/3T$ se forman dos patrones de circulación, en cambio para $C = 1/8T$ solo se forma uno [14]. Siendo $C = 1/3T$ el valor comúnmente empleado en un sistema con solo fase líquida y con un solo impulsor [1], [11].

Figura 2.5.- Efecto de C en los patrones de flujo
- (a) $C = 1/3T$ y (b) $C = 1/8T$ [14].

Los deflectores son otro componente del tanque a considerar, en general se utilizan cuando el flujo se encuentra en estado transitorio o turbulento, con el fin de impedir la formación de un vórtice en la superficie del fluido, como se observa en la Figura 2.6 (a), de esta forma se previene la rotación del fluido en forma de sólido y la introducción de aire al sistema, siendo esta última una causa de falla debido a las vibraciones que se pueden llegar a generar cuando el sistema se mantiene operando en estas condiciones.

Sumado a esto, se favorece la circulación axial entre el fondo y la parte superior del tanque lo que conduce a mejorar el resultado del proceso que se esté realizando. Por ejemplo, en la Figura 2.6 (b) se muestra que las partículas sólidas se logran suspender en el fluido a lo largo de todo el tanque debido a los deflectores.

Cuando se utiliza un impulsor de cuatro paletas inclinadas o una turbina Rushton de seis paletas, regularmente se instalan cuatro deflectores en el tanque. Sin embargo, cuando se utiliza un impulsor de alta eficiencia es viable utilizar únicamente tres, debido a la mayor capacidad de generar un flujo axial por parte de este tipo de impulsores.

Figura 2.6.- Efecto de los deflectores en el patrón de flujo – tanque de agitación (a) sin deflectores y (b) con deflectores [15].

Algunas empresas como Pfaudler ofrecen deflectores con diferentes geometrías y funciones adicionales, por ejemplo, tiene opciones para monitorear alguna variable al incorporar algún tipo de sonda de medición o para llevar a cabo una transferencia de calor por medio de sus superficies. Además, pueden ser usados como medio de acceso para la obtención de muestras y como conducto para introducir alguna sustancia líquida o gaseosa. En la Figura 2.7 se presentan los diagramas de las opciones que ofrece Pfaudler.

Figura 2.7.- Geometrías utilizadas en los deflectores [6].

En la Figura 2.8 se muestran otras alternativas para evitar la formación del vórtice central, correspondientes a la localización no concéntrica o inclinada del impulsor. Su aplicación solo se recomienda cuando el tanque de agitación es pequeño ($T < 3\text{m}$), debido al desbalance de fuerzas generado al agitar el fluido [15]. En general se

recomienda que el eje del impulsor se desplace radialmente una distancia de $T/6$ para crear la excentricidad, Figura 2.8 (a), y que la inclinación se encuentre en el rango de 10° a 15° , de tal forma que se obtenga un resultado parecido al que se muestra en la Figura 2.8 (b) [15].

Figura 2.8.- Impulsor no concéntrico – (a) con excentricidad de $T/6$ y (b) con una inclinación de 10° - 15° [15].

En la Figura 2.9 se presenta otra variación del sistema basa en el diámetro del tanque, donde al tener $T > 9\text{m}$ se recomienda que el impulsor se introduzca de forma lateral para mejorar la agitación [1]. Siendo esta opción ampliamente utilizada por la industria petrolera en los tanques de almacenamiento y refinación del petróleo [8], [9].

Figura 2.9.- Agitación lateral del tanque [8].

El impulsor es otro componente que afecta de forma significativa la eficiencia del proceso que se realiza dentro del tanque. Siendo muy probablemente el que tiene la mayor cantidad de opciones disponibles a elegir, con el objetivo de garantizar la eficiente agitación en cada uno de los procesos que se realizan en el tanque.

Posiblemente la forma más general de clasificarlos está basada en la dirección del fluido de la zona próxima a las paletas, dando lugar a los impulsores de flujo axial, radial y mixto, como se representan en la Figura 2.10. Con base en esta clasificación existen recomendaciones para la selección del impulsor. Teniendo así que uno de flujo axial es más eficiente para inducción de gas, mezclar líquidos, suspender sólidos y para la transferencia de calor [1].

Figura 2.10.- Impulsor de flujo (a) axial, (b) radial y (c) mixto [16].

Por su parte los de flujo radial se recomiendan para la dispersión de gas-líquido y líquido-líquido, caracterizándose por sus altos niveles de corte y turbulencia, así como un bajo bombeo [1]. En tanto los de flujo mixto se recomiendan para la suspensión y dispersión de sólidos, así como en aquellas aplicaciones donde el fluido presenta un cambio significativo en su viscosidad [4], [5], [7].

Otra forma de seleccionar el impulsor es con base en la viscosidad del fluido. Donde los impulsores tipo hélice, turbinas y de paletas planas, se recomiendan para viscosidades menores a 2kcP, 50kcP y 1McP, respectivamente, para procesos como el mezclado, dispersión de gases y suspensión de sólidos en líquidos [3].

Sin embargo, los impulsores tipo ancla, helicoidales, de tornillo y con paletas en forma de Z, se recomiendan para mezclar líquidos de alta viscosidad ($>1\text{McP}$), pastas, gomas, masas y dispersión de sólidos en líquidos [3].

En la Figura 2.11, se presentan los rangos de viscosidad en los que se recomienda el uso de varios impulsores, teniendo que los de tipo hélice y turbina se recomiendan para la agitación de caldos de cultivo [10].

Figura 2.11.- Rangos de viscosidad para diferentes impulsores [10].

Otra alternativa para la elección está basada en los patrones de flujo que genera el impulsor, de este modo se recomienda cada uno para realizar de forma eficiente una acción en especial, como se observa en la Tabla 2.3.

En la cual se indica que el impulsor de paletas inclinadas (PBT por sus siglas en inglés – Pitched Blade Turbine) se recomienda para mezcla de fluidos miscibles, suspensión de sólidos, operaciones relacionadas con la transferencia de calor, así como la incorporación de sólidos y gases que se encuentran en la superficie del fluido [15].

Por su parte, los impulsores de alta eficiencia (HE-3 y Maxflo T) que se caracterizan por su alta capacidad de bombeo y su baja disipación de energía, se recomiendan para mezclas con fluidos de baja viscosidad, suspensión de sólidos y para llevar a cabo un proceso de transferencia de calor [15]. En tanto las turbinas de disco (Rushton) características por sus altos niveles de corte y disipación de energía, se recomiendan para la dispersión de fluidos inmiscibles [15].

Tabla 2.3.- Impulsores y patrones de flujo [17].

Impulsor	Patrón de flujo	Nombre y aplicación
Impulsor de alta eficiencia (HE-3) - Mezcla, transferencia de calor en flujos turbulentos, suspensión de sólidos y dispersión de gases.
Turbina de paletas inclinadas (P-4) - Mezcla en flujo turbulento, dispersión, suspensión de sólidos y transferencia de calor.
Turbina de paletas planas (S-4) - Mezcla con flujo local y dispersión.
Maxflo T - Mezcla en flujo transitorio, dispersión de gas y suspensión de sólidos.
ChemShear - Dispersión liquido-liquido, dispersión solido-liquido, corte local.
Turbina Rushton (D-6) - Dispersión de gas con flujo bajo e intermedio y dispersión liquido-liquido.
Turbina de paletas cóncavas (CD-6) - Dispersión de gas con flujo intermedio y alto.
Impulsor de cinta helicoidal doble - Mezcla y transferencia de calor en fluidos viscosos ($\mu > 50 \text{ Pa}\cdot\text{s}$).
Turbina tipo ancla - Transferencia de calor en fluidos viscosos.
HE-3 o Mark II - Almacenamiento de petróleo, pulpa de papel, circulación de aguas residuales y desulfuración de gas.
CD-6 / HE-3 - Dispersión de gas, mezcla, fermentación en tanques.
CD-6 / HE-3 / P-4 - Dispersión de gas, mezcla y reducción de tamaño de sólidos.

Por otra parte, también es posible hacer la elección del impulsor con base en la cantidad de turbulencia generada y de su capacidad de bombeo [10], [16]. En este caso se observa en la Figura 2.12 que los impulsores que tiene un mejor balance de estas características es el de paletas inclinadas y el de hélices.

Figura 2.12.- Características para diferentes impulsores con respecto a la generación de turbulencia y el bombeo de líquido [10].

Con base en lo antes mencionado, se hace claro el interés que se tiene sobre cada uno de los componentes, debido a la influencia que poseen sobre el comportamiento del flujo que se genera dentro del tanque de agitación.

2.2.- Investigaciones del tanque de agitación

La mayoría de los estudios relacionados con la hidrodinámica del tanque se realizan de forma experimental y/o numérica. La primera realiza mediciones de los campos de velocidad principalmente con técnicas como la velocimetría por imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés – Particle Image Velocimetry) y la velocimetría por láser Doppler (LDV por sus siglas en inglés – Laser Doppler Velocimetry).

Sumado a esto, el campo de una propiedad escalar puede ser medida por medio de la técnica de fluorescencia inducida por láser (PLIF por sus siglas en inglés – Planar Laser-Induced Fluorescence), además, se puede medir la potencia requerida por el impulsor para un punto de operación determinado, al emplear un sensor de torque, siendo estas, algunas de las técnicas experimentales que se emplean regularmente para este tipo de investigaciones [1], [10].

En el segundo caso, se utiliza la dinámica de fluidos computacional para resolver las ecuaciones rectoras del flujo. Algunas de las técnicas empleadas son las ecuaciones de Navier-Stokes con promediado de Reynolds (RANS por sus siglas en inglés – Reynolds Average Navier-Stokes), la simulación del remolino desprendido (DES por sus siglas en inglés – Detached Eddy Simulation). La simulación de los grandes remolinos (LES por sus siglas en inglés – Large Eddy Simulation) y la simulación numérica directa (DNS por sus siglas en inglés – Direct Numerical Simulation) [1], [10].

La principal desventaja de la técnica LDV es que esta realiza la medición de un solo punto del sistema, si bien es posible utilizar un arreglo para medir múltiples puntos, el costo excesivo de este sistema es su principal limitante. Por otro lado, su principal ventaja es la resolución espacial y temporal con la que cuenta, esta típicamente se compone de un volumen de medición de 100 μ m de diámetro por 1mm de longitud, con una velocidad de muestreo de 10kHz [1].

Por su parte, la técnica PIV tiene como principal desventaja la resolución espacial y temporal de muestreo, la cual típicamente está conformada por regiones de interrogación de unos pocos mm (por ejemplo, 3mm x 3mm), con una velocidad de muestreo de 30Hz [1]. Siendo su principal ventaja, la medición de la velocidad en un número considerable de puntos (por ejemplo 15914) de forma simultánea.

El caso de la técnica PLIF es similar a la PIV, debido a que el láser y la cámara fotográfica que se utiliza en ambos es el mismo. Sumado a lo anterior, las tres técnicas tienen la ventaja de no ser intrusivas, por lo cual no afectan el comportamiento del fluido que se está midiendo [1].

Por su parte, las desventajas asociadas a las técnicas numéricas son que no siempre se puede obtener un resultado con la precisión requerida, existe un número limitado de modelos de turbulencia disponibles, por último se tiene la restricción relacionada con las características del equipo de cómputo que se requiere para su implementación, esto es la capacidad de cómputo y el espacio de almacenamiento [18].

Sin embargo, sus principales ventajas son la reducción del tiempo y costo en la fase de diseño, la posibilidad de analizar puntos de operación inaccesibles para las técnicas experimentales, la facilidad de realizar estudios paramétricos y la obtención casi ilimitada de la información del sistema [18].

La técnica más empleada en las investigaciones es la RANS, debido a su bajo costo computacional, sin embargo, esta técnica tiene la desventaja de modelar todas las escalas de turbulencia del flujo. Por su parte, la técnica DNS se considera que proporciona las mejores estimaciones del del flujo de un fluido, como consecuencia de calcular directamente todas las escalas de turbulencia. Sin embargo, esto produce un incremento del costo y de los recursos computacionales de forma significativa, por lo que únicamente se utiliza en centros de investigación que cuentan con super computadoras [19].

Mientras las técnicas DES y LES se consideran como intermedias, debido a que resuelven directamente solo parte de la turbulencia y la otra la obtienen por medio de un modelo de turbulencia. En el caso de la técnica DES, esta utiliza los mismos modelos que la técnica RANS, por su parte la técnica LES emplea unos modelos denominados de submalla.

En la Tabla 2.4 se presenta una recopilación de investigaciones experimentales, que analizan el desempeño del tanque de agitación cuando se modifica su configuración, mencionándose a continuación algunas de las más interesante. Por ejemplo, la investigación realizada por Bilel et al. [20], se enfocó en analizar la influencia de la inclinación de las paletas del impulsor en la velocidad, la vorticidad y la energía cinética turbulenta por medio de la técnica de PIV. Observando un incremento de la energía cinética turbulenta al incrementar la inclinación de las paletas, como se muestra en la Figura 2.13.

Figura 2.13.- Energía cinética turbulenta para el impulsor con una inclinación de las paletas de (a) 45°, (b) 60° y (c) 75° [20].

Además, permite visualizar que los mayores gradientes se concentran en la zona que se encuentra por debajo del impulsor, debido a que es ahí donde se realiza la descarga del flujo y por ende la zona con mayor transferencia de energía.

En tanto la Figura 2.14 presenta los contornos de la concentración de Rodamina B que obtuvieron Hu et al. [21] al utilizar la técnica de PLIF. En este caso la investigación se enfocó en analizar los efectos de la velocidad de rotación, la posición del impulsor y las propiedades del fluido en el micromezclado de un tanque sin deflectores, determinando que el incremento de la velocidad y el decremento de la viscosidad, amplifican el micromezclado, conduciendo a una intensificación de las reacciones químicas que se realizan en el tanque, cuando el impulsor se encuentra a una distancia de $T/3$ del fondo del tanque.

Figura 2.14.- Concentración de Rodamina B [21].

Por su parte Gabriele et al. [22] se enfocaron en determinar las características del flujo utilizando la técnica de PIV, como consecuencia de invertir el sentido de bombeo del impulsor.

Tabla 2.4.- Estudios experimentales del tanque de agitación.

Artículo	Técnica experimental	Impulsor	Variables estudiadas
Ranade et al. [23]	LDV	PBT	Velocidad, intensidad de la turbulencia, número de bombeo, eficiencia hidráulica
Kresta et al. [24]	LDV	PBT	Energía cinética turbulenta, tasa de disipación, esfuerzos de Reynolds
Kresta et al. [25]	LDV	PBT	Velocidad, patrones de circulación
Mao et al. [26]	LDV	PBT	Número de bombeo, velocidad, patrones de circulación
Pettersson et al. [27]	LDV	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación, esfuerzos de Reynolds
Sheng et al. [28]	PIV	PBT	Velocidad, tasa de disipación
Aubin et al. [29]	LDV	PBT Mixel TT	Velocidad, energía cinética turbulenta, número de bombeo, número de potencia, índice de agitación
Wu et al. [30]	LDV	PBT Rushton A310 Smith	Velocidad, número de potencia, número de bombeo
Fort et al. [31]	LDV	PBT	Velocidad, eficiencia energética, número de bombeo, número de potencia
Chapple et al. [32]	Transductor de torque	PBT Rushton	Número de potencia
Khan et al. [33]	PIV	PBT	Energía cinética turbulenta, vorticidad, velocidad, número de bombeo
Khan et al. [34]	PIV	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación
Gabriele et al. [22]	PIV	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación, vorticidad
Hu et al. [21]	PLIF	PBT	Concentración, tiempo de mezclado, grado de reacción
Bilel et al. [20]	PIV	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, vorticidad, viscosidad turbulenta
Taghavi et al. [35]	PIV PLIF	PBT Rushton	Concentración, tiempo de mezclado, tasa de disipación, velocidad, energía cinética turbulenta
Stelmach et al. [36]	PIV	Disco	Velocidad, tasa de disipación, escala de Kolmogorov
Paglianti et al. [37]	PIV PLIF	Rushton	Velocidad, esfuerzos de Reynolds, concentración, viscosidad turbulenta, número de Schmidt, difusividad turbulenta

Tabla 2.4.- Estudios experimentales del tanque de agitación (continuación).

Artículo	Técnica experimental	Impulsor	Variables estudiadas
Harrison et al. [38]	Tomografía de resistencia eléctrica	Rushton	Concentración, índice de mezclado
Afshar et al. [39]	Conductividad eléctrica Analizador de potencia	PBT Rushton Smith HE-3	Número de potencia, tasa de disipación, tiempo de mezclado
Fernandes et al. [40]	PIV	A310	Velocidad, tasa de corte, tasa de disipación, energía cinética turbulenta
Cappello et al. [41]	Sonda óptica Sonda de oxígeno	Rushton	Tamaño de partícula, retención de gas, coeficiente de transferencia de masa

Reportando que la velocidad es mayor cuando el flujo se bombea en dirección descendente, que las estructuras de las estelas que se desprenden de las paletas son totalmente diferentes una de la otra. Sumado a lo anterior, observaron que los gradientes de energía cinética turbulenta se amplifican cuando el flujo es bombeado en dirección ascendente, como se advierte en la Figura 2.15.

Figura 2.15.- Tasa de disipación específica para el impulsor (a) con bombeo ascendente y (b) con bombeo descendente [22].

Las investigaciones de la Tabla 2.4, están limitadas a la adquisición de la información para un pequeño volumen, plano o punto de medición dentro del tanque de agitación, restringiendo la obtención de descripciones tridimensionales de las diferentes variables de interés.

Este inconveniente ha motivado el uso de la dinámica de fluidos computacional, debido a la relativa facilidad de obtener información tridimensional. En la Tabla 2.5 se presenta una recopilación de investigaciones que utilizan diversas técnicas numéricas, con el objetivo de evaluar su funcionamiento.

Dentro de las más interesantes se encuentra la realizada por Basbug et al. [42], en el centro de supercómputo ARCHER HPC en Inglaterra. La cual se enfoca en estudiar los cambios del fluido cuando se utiliza un impulsor de fractales, implementando la técnica DNS. La Figura 2.16 permite observar que la tasa de disipación para el impulsor de paletas planas, es más concentrada en la zona cercana a la punta de las paletas, en tanto la distribución generada por el impulsor de fractales es más dispersa, sumado a esto, la magnitud de la disipación máxima obtenida es menor para esta configuración.

Figura 2.16.- Tasa de disipación específica para el impulsor (a) de paletas planas y (b) de fractales [42].

Por su parte Yang et al. [43] decidieron implementar la técnica DES, la cual tiene la ventaja de obtener mejores resultados que la técnica RANS pero sin el costo excesivo de la técnica DNS. En su estudio encontraron que el incremento de la excentricidad (e) del impulsor en el tanque de agitación, conduce a generar una asimetría de los patrones de flujo y la producción de nuevos vórtices, como se observa en la Figura 2.17. Teniendo como efecto secundario una reducción del tiempo de mezclado.

Tabla 2.5.- Estudios numéricos del tanque de agitación.

Artículo	Técnica	Impulsor	Variables estudiadas
Fokema et al. [44]	K- ϵ	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación
Sahu et al. [45]	K- ϵ	MODPTD CONPTD CURPTD MPTD Propela	Velocidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación
Harris et al. [46]	K- ϵ estándar, RNG RSM	PBT Rushton	Velocidad, energía cinética turbulenta, temperatura
Bakker et al. [47]	K- ϵ RNG	PBT	Velocidad, número de bombeo
Sahu et al. [48]	K- ϵ	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación
Derksen et al. [49]	LES Smagorinsky, función de estructura	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta
Nere et al. [50]	K- ϵ	PBT HF	Velocidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación
Ranade et al. [51]	K- ϵ	PBT Rushton	Velocidad, energía cinética turbulenta, vorticidad
Aubin et al. [52]	K- ϵ estándar, RNG RSM	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, número de potencia, número de bombeo
Montante et al. [53]	K- ϵ multifase	PBT Rushton	Velocidad, concentración, número de potencia, número de bombeo
Tyagi et al. [54]	LES	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, esfuerzos de Reynolds
Achouri et al. [55]	K- ϵ multifase	PBT	Tasa de la inducción de gas, número de potencia, fracción volumétrica, presión, velocidad
Yang et al. [43]	DES	PBT	Velocidad, concentración, tiempo de mezclado
Karimi et al. [56]	K- ϵ estándar, RNG, realizable SST k- ω estándar, SST k-kl- ω Spalart-Allmaras DES LES Smagorinsky, WALE, energía cinética dinámica	Paletas planas	Velocidad, energía cinética turbulenta

Tabla 2.5.- Estudios numéricos del tanque de agitación (continuación).

Artículo	Técnica	Impulsor	Variables estudiadas
Oliver et al. [57]	K- ϵ realizable	PBT	Velocidad, vorticidad, intensidad de turbulencia, número de potencia, concentración, número de bombeo
Vlcek et al. [58]	LES Smagorinsky dinámico	PBT	Velocidad, número de bombeo, número de potencia, torque
Lane et al. [59]	K- ϵ SST EARSIM DES	A310	Velocidad, vorticidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación
Zamiri et al. [60]	k- ω SST SST SAS	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, presión, vorticidad, torque, número de potencia
Basbug et al. [42]	DNS	Fractales Paletas planas	Intensidad de turbulencia, coeficiente de presión, velocidad, vorticidad, tasa de disipación, número de potencia
Tamburini et al. [61]	DNS	Rushton	Velocidad, número de potencia, número de bombeo
Haringa et al. [62]	K- ϵ realizable RSM LES Smagorinsky dinámico	Rushton	Velocidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación, tiempo de mezclado
Li et al. [63]	k- ω SST	Paletas planas	Número de potencia, velocidad, torque

Sumado a lo anterior, también es común encontrar estudios donde se realizan mediciones numéricas y experimentales del tanque de agitación. En la Tabla 2.6 se presenta una recopilación de este tipo de investigaciones.

Figura 2.17.- Vectores de velocidad para el impulsor (a) concéntrico, (b) con $e= 0.2$, (c) con $e= 0.3$ y (d) con $e= 0.5$ [43].

Dentro de las más interesantes esta la realizada por Ge et al. [64], en la cual utilizaron las técnicas PIV y RANS para analizar la variación del desempeño del tanque al emplear los impulsores de la Figura 2.18.

Figura 2.18.- Impulsor (a) m-PBT20, (b) m-PBT30, (c) m-PBT40
(d) m-PBT45, (e) PBT45-3 y (f) PBT45-4 [64].

Reportando que los resultados obtenidos con ambas técnicas muestran una buena similitud, como se observa en la Figura 2.19. Además, observaron un incremento de la velocidad radial alrededor del impulsor y de la velocidad axial en la zona central del tanque, como resultado de modificar la geometría de las paletas del impulsor.

Figura 2.19.- Distribución de la velocidad promedio para el impulsor m-PBT40
obtenida mediante la técnica (a) PIV y (b) RANS [64].

Tabla 2.6.- Estudios experimentales y numéricos del tanque de agitación.

Artículo	Técnica experimental	Técnica numérica	Impulsor	Variables estudiadas
Ranade et al. [65]	LDV	K- ϵ	MODPTD CONPTD CURPTD MPTD Propela	Velocidad, energía cinética turbulenta, número de potencia, número de bombeo
Bakker et al. [66]	LDV PIV	K- ϵ estándar, RNG RSM	PBT	Velocidad, tasa de disipación, número de potencia
Armenante et al. [67]	LDV	K- ϵ ASM	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, número de potencia, número de bombeo
Patwardhan et al. [68]	LDV	K- ϵ	PBT HF	Velocidad, tiempo de mezclado, concentración, número de potencia, número de bombeo
Montante et al. [69]	Atenuación de luz	K- ϵ multifase	PBT	Concentración
Jaworski et al. [70]	LDV	K- ϵ estándar, RNG	PBT	Velocidad, patrones de flujo
Jaworski et al. [71]	LDV	K- ϵ estándar, RNG, realizable, Chen-Kim, Chen-Kim optimizado RSM	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta
Roussinova et al. [72]	LDV	LES	PBT	Velocidad, distribución de frecuencia
Li et al. [73]	LDV	SST	Paletas curvadas	Velocidad, número de potencia, número de bombeo
Kumaresan et al. [74]	LDV Celda de carga Sonda de conductividad	K- ϵ	PBT HF4	Velocidad, energía cinética turbulenta, número de potencia, tiempo de mezclado, número de bombeo
Murthy et al. [75]	Anemometría por turbina Sonda magnética Celda de carga	K- ϵ	PBT	Velocidad, número de potencia, presión, razón de inducción de gas, fracción volumétrica de gas
Murthy et al. [76]	LDV	LES Smagorinsky dinámico K- ϵ RST	PBT Rushton HF	Velocidad, energía cinética turbulenta, número de potencia

Tabla 2.6.- Estudios experimentales y numéricos del tanque de agitación (continuación).

Artículo	Técnica experimental	Técnica numérica	Impulsor	Variables estudiadas
Nurtono et al. [77]	Visualización de flujo	LES	PBT Rushton FT	Velocidad, patrones de flujo
Ding et al. [78]	Medidor de gas húmedo Cromatografía	K- ϵ	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, fracción volumétrica de gas
Roy et al. [79]	PIV	LES	PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, anisotropía, vorticidad
Ge et al. [64]	PIV	K- ϵ	PBT m-PBT	Velocidad, energía cinética turbulenta, número de potencia, tasa de disipación, número de bombeo
Meng et al. [80]	PIV	K- ϵ	PBT HF Paletas de malla	Velocidad, energía cinética turbulenta, esfuerzos de corte, presión
Bashiri et al. [81]	Seguimiento de partícula radioactiva	K- ϵ estándar, RNG	PBT Rushton	Velocidad, tiempo de mezclado
Zhang et al. [82]	PIV	DNS SST	Rushton	Velocidad, energía cinética turbulenta, vorticidad, número de potencia
Martínez et al. [83]	Transductor de torque	VOF	NR-3.0 NR1.5 Sawtooth Hockmeyer	Número de potencia, número de bombeo, velocidad, disipación viscosa
Haringa et al. [84]	LDV	K- ϵ realizable RSM	Rushton	Velocidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación, tiempo de mezclado
Balemans et al. [85]	Prueba de jarras Distribución de tamaño de partícula	K- ϵ	Paletas planas Propela	Concentración de sólidos, gradiente de velocidad, tamaño de partícula
Aslanbay et al. [86]	Viscosímetro Microscopio Espectrofotómetro	K- ϵ realizable	Rushton	Concentración, velocidad, vorticidad, energía cinética turbulenta

Al revisar las investigaciones de las Tablas 1.5 y 1.6, se encontraron múltiples investigaciones que reportan una buena concordancia entre los campos de velocidad obtenidos mediante la técnica RANS y las diferentes técnicas experimentales.

Sin embargo, no es el caso para las variables turbulentas, en especial para la energía cinética turbulenta y para su tasa de disipación, con particular énfasis en la zona cercana al impulsor, debido a que los resultados presentan una subestimación o una sobreestimación de estos [48], [52], [59], [62], [64], [71], [76], [84], [87]. Un claro ejemplo se muestra en la Figura 2.20, correspondiente a los resultados de Aubin et al. [52] donde se aprecia la subestimación de la energía cinética turbulenta.

Figura 2.20.- Energía cinética turbulenta adimensional – configuración (a) FR/HUW/ κ - ϵ , (b) CA/HUW/ κ - ϵ , (c) SM/HUW/ κ - ϵ , (d) FR/UW/ κ - ϵ , (e) FR/QDS/ κ - ϵ , (f) FR/HUW/RNG y (g) LDV [52].

Capítulo 3

Desarrollo experimental

3.1.- Velocimetría por imágenes de partículas bidimensional

Esta técnica de medición de la velocidad, permite muestrear un significativo número de puntos en un plano al mismo tiempo, lo que representa una ventaja con respecto a otros instrumentos empleados con esta finalidad. Esta técnica no intrusiva se fundamenta en el seguimiento de partículas trazadoras, las cuales representan el comportamiento hidrodinámico del flujo en el área de medición.

Para esto un láser dispara un par de pulsos a un intervalo de tiempo determinado, iluminando el área de interés con la finalidad que las partículas reflejen la luz. Estas partículas poseen características especiales, tales como el material de construcción, tamaño, densidad e índice de refracción. En la Tabla 3.1 se presentan algunas de las opciones que tiene disponible la empresa TSI.

De las cuales las partículas huecas mejoran la similitud con respecto a la densidad del fluido, en tanto las que poseen recubrimiento maximizan el reflejo de la luz emitida por el láser [88]. La elección de la partícula se basa en el tipo de medición y en las particularidades del sistema, con el fin de garantizar su buen desempeño en la medición.

Una buena elección permite a la cámara fotográfica la captura de imágenes, donde se visualizan cada una de las partículas presentes en el área de medición, tal como se aprecia en la Figura 3.1.

Tabla 3.1.- Características de las partículas trazadoras [88].

TSI modelo	Tipo de partícula	Diámetro promedio (μm)	Densidad (g/cc)	Índice de refracción	Cantidad
900805	Tinte PSL	1.0	1.05	-	10ml
10081	Carburo de silicio	1.5	3.2	2.65	100cc
10084	Nilón	4	1.14	1.53	400cc
10054A	PSL	0.54	1.05	1.55 -1.6	1.5ml
10086A	Dióxido de titanio	3 -5	4.2	2.6	1lb
10087	Recubrimiento metálico	9	2.6	0.21	30cc
10089	Esferas de vidrio huecas	8 -12	10.5 – 1.15	1.5	1000cc

Una vez capturadas las imágenes se procesan con ayuda de un programa, el cual es parte del sistema de velocimetría y es proporcionado por el fabricante. Por ejemplo, la empresa Dantec Dynamics utiliza DynamicStudio, LaVision utiliza DaVis TR-PIV y TSI utiliza INSIGHT 4G™. Siendo este último el que se empleó en la presente investigación. Estos programas aplican algoritmos de correlación cruzada para determinar el movimiento de las partículas, permitiendo de esta forma obtener la velocidad en cada uno de los puntos de medición del área analizada.

Figura 3.1.- Imagen de partículas [89].

3.1.1.- Equipo experimental

En la Figura 3.2 se muestra un modelo del tanque de agitación que se utilizó en la investigación. En el cual se observa que se trata de un tanque cilíndrico de fondo plano con deflectores, implementando un solo impulsor concéntrico montando sobre un eje que está conectado a un motor eléctrico.

Figura 3.2.- Tanque de agitación.

El tanque de agitación está hecho de acrílico de un espesor de 3mm, con un diámetro interno de 25cm (**T**), el cual requiere alrededor de 11 litros de agua para alcanzar una altura de 25cm (**H**), como se muestra en la Figura 3.3. Este a su vez es introducido en un tanque rectangular, el cual se llena con el mismo líquido y a la misma altura, con la finalidad de reducir la refracción del haz de luz que dispara el láser, como consecuencia de la superficie curva del tanque cilíndrico.

El tanque cuenta con cuatro deflectores de un espesor de 3mm y un ancho de 2.5cm, montados en las paredes internas de forma equidistante y a lo largo de toda la altura del mismo. El impulsor fue colocado de forma concéntrica a una altura del fondo del tanque igual a $C = 1/3T$, como se muestra en la Figura 3.3.

Los tres impulsores que se utilizaron son de flujo mixto, sin embargo, cabe mencionar que su dirección principal de bombeo es axial con sentido hacia el fondo del tanque, el caso base es una turbina de cuatro paletas inclinadas a 45° (PBT), Figura 3.4, el cual se utiliza para la comparación de los parámetros calculados, debido a que es uno de los impulsores más utilizados en la industria.

Figura 3.3.- Esquema del tanque de agitación.

En la Figura 3.4 se observa que el segundo impulsor tiene una modificación en las paredes de las paletas, ya que se aplicaron unos surcos en forma de U. El tercer impulsor cuenta con una modificación similar al anterior, siendo en este caso los surcos en forma de V.

Figura 3.4.- Impulsor (a) PBT, (b) U y (c) V.

Cabe mencionar que los tres impulsores tienen la misma inclinación (45°), número de paletas (4), un diámetro de 8cm (**D**) y un ancho de la paleta de 14.3mm (**W**). En la Figura 3.5 se presenta la descripción geométrica detallada de los tres impulsores, con especial énfasis en las dimensiones de los surcos en forma de U y V.

Figura 3.5.- Descripción geometría del impulsor (a) PBT, (b) U y (c) V [90].

Al realizar las mediciones los impulsores se montaron en un eje acoplado a un motor con variador de velocidad, como se observa en la Figura 3.2. En el presente estudio el punto de operación que se analizó fue a una velocidad de 500 rpm (**N**).

Al calcular el número de Reynolds ($Re = \rho N D^2 / \mu \approx 52000$) para este punto, se tiene que el flujo es turbulento. Para lo cual se tomó un valor de **N**= 500rpm, $D= 8\text{cm}$, de la densidad (ρ) de $998.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y de la viscosidad dinámica (μ) de $0.001003\text{Pa}\cdot\text{s}$.

Por otra parte, en la Figura 3.6 se muestra el esquema del sistema de medición, donde se aprecia que el láser y la cámara fotográfica están conectados a un sincronizador, el cual tiene la función de hacer coincidir los disparos del haz de luz con las capturas fotográficas.

Figura 3.6.- Componentes del PIV [91].

El sistema de PIV bidimensional implementado en esta investigación está constituido por un láser de doble pulso Nd:YAG de EverGreen modelo YAG70-15QTL, que emite un haz de luz con una longitud de onda de 532nm y un pulso de 75mJ, al cual se le acoplan un par de lentes cilíndricos para generar la divergencia del haz de luz que proporciona el láser, con una longitud de foco de -15mm y de -25mm.

La cámara utilizada es una PowerView 4MP-LS modelo 630090, con una resolución de 2360 X 1776 pixeles, teniendo la capacidad de tomar un par de fotos con una diferencia de 195ns a una frecuencia de 16 tomas por segundo. A esta cámara se le incorporo un lente AF Nikkor de 50mm, siendo este ideal para capturas de alta velocidad con un rango de apertura de $f/1.8 - f/22$, con una distancia focal mínima de 45mm.

En cuanto a la posición del láser y la cámara, se colocaron de forma perpendicular a las paredes del tanque rectangular, de tal forma que exista un ángulo de 90° entre estos dos componentes, como se muestra en la Figura 3.6.

La distancia de la cámara con respecto a la pared del tanque dependerá de la zona de análisis que se requiera explorar, y estará delimitado por la capacidad de enfoque del lente utilizado. Por su parte, la distancia del láser a la pared será aquella que asegure que el área de interés se encuentre iluminada completamente, estando delimitado por el ángulo de divergencia y la intensidad del haz de luz.

En la presente investigación se analizó un área aproximada de 7 x 10cm, como se muestra en la Figura 3.7. Obteniendo para cada uno de los experimentos 400 pares de imágenes, los cuales se procesaron empleando el programa INSIGHT 4G™. El cual proporciona archivos de texto donde se tienen los valores de la velocidad axial y radial para cada una de las coordenadas de cada campo de velocidad obtenido.

Es importante mencionar que antes de empezar a realizar los experimentos, se efectuó una calibración dimensional de las imágenes, esto con el objetivo de que el programa determinara la distancia real que se desplazan las partículas.

3.2.- Medición de torque

Para medir el torque se utilizó un sensor de torque rotativo Futek modelo TRH300-FSH1980, el cual tiene una capacidad máxima de medición de 6Nm, una resolución de 6mNm y una precisión de 0.5%.

Al realizar la medición, el sensor se coloca entre el motor y el eje donde se monta el impulsor. Posteriormente se adquieren alrededor de 900 mediciones con una frecuencia de 50 Hz. Siendo la magnitud del torque, el valor promedio de las mediciones realizadas para cada uno de los impulsores.

Figura 3.7.- Área de análisis.

3.3.- Cálculo de parámetros turbulentos

3.3.1.- Energía cinética turbulenta y tasa de disipación

La importancia de la energía cinética turbulenta (k) y de su tasa de disipación (ϵ) radica en su relación con el macro y micromezclado del tanque, estos a su vez están vinculados a los remolinos de mayor y de menor tamaño que origina el impulsor.

Como no existe una forma directa de medir estas variables, lo común es utilizar los campos de velocidad para conseguir una estimación, sin embargo, la complejidad asociada a su obtención ha conducido a la formulación de una variedad de aproximaciones, las cuales han evolucionado en relación al progreso que han tenido los equipos de medición, en especial como resultado del incremento en las componentes de velocidad y en la resolución de la información que son capaces de muestrear.

En el caso de k , la ecuación (3.1) toma en cuenta las tres componentes de la velocidad, sin embargo, en los equipos bidimensionales es común aplicar la consideración de la turbulencia isotrópica. Esto se realiza con el fin de poder generar una aproximación de la componente faltante, ecuación (3.2), dando como resultado una expresión de k donde únicamente se consideran dos componentes de la velocidad, ecuación (3.3).

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (3.1)$$

$$w'^2 = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) \quad (3.2)$$

$$k = \frac{3}{4}(u'^2 + v'^2) \quad (3.3)$$

Este procedimiento es ampliamente utilizado por diferentes investigadores [22], [28], [34], [64], [92]–[99], debido a que proporciona muy buenos resultados, incluso se ha reportado que estos prestan una buena correlación con aquellos que emplearon las tres componentes de la velocidad, tal como se muestra en la Figura 3.8.

Figura 3.8.- Energía cinética turbulenta normalizada obtenida con (a) dos componentes de velocidad y (b) con tres componentes de velocidad [34].

Por su parte la estimación de ε es aún más compleja, por tal motivo esta variable tiene un mayor número de aproximaciones empleadas por los investigadores, siendo las más comunes aquellas conocidas como análisis dimensional, evaluación directa, y evaluación LES, ecuación (3.4), (3.5) y (3.6), respectivamente [22], [28], [33], [94], [96]–[106].

Donde A es una constante de proporcionalidad, Λ es la escala de longitud integral, k es la energía cinética turbulenta, ν es la viscosidad cinemática, C_s es la constante de Smagorinsky y Δ es la resolución espacial.

$$\varepsilon = A \frac{k^{3/2}}{\Lambda} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon = \nu \left(2 \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right)^2 + 3 \left(\frac{\partial v'}{\partial x} \right)^2 + 3 \left(\frac{\partial u'}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u'}{\partial y} \frac{\partial v'}{\partial x} \right) \right) \quad (3.5)$$

$$\varepsilon = (C_s \Delta)^2 \left(4 \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u'}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v'}{\partial x} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.6)$$

En este caso los resultados obtenidos al utilizar las ecuaciones (3.4) -(3.6), presentan una variación significativa en la magnitud estimada, aun cuando se ocupan las mismas mediciones de los campos de velocidad, como se observa en la Figura 3.9.

Figura 3.9.- Tasa de disipación obtenida mediante (a) evaluación directa, (b) análisis dimensional y (c) evaluación LES [22].

En esta investigación se utilizaron las ecuaciones (3.3) y (3.6) para calcular k y ε , respectivamente. Esta elección se tomó con base en que el sistema de velocimetría es bidimensional, y que la resolución de la cámara fotográfica no es suficiente para capturar la información en la escala de Kolmogorov (η).

En este sentido la formulación de la ecuación (3.6), toma en cuenta la resolución de las imágenes obtenidas mediante la técnica PIV, y en los casos donde está es mayor a la escala de Kolmogorov, la ecuación modela la información faltante, lo que resulta en una mejor aproximación de ε [22], [28], [96], [97], [99], [101], [105], [107].

A propósito de mejorar la estimación de ε , se determinó el valor de la constante de Smagorinsky, tomando en cuenta la resolución de las imágenes (Δ) y η de las mediciones realizadas en el tanque de agitación.

La resolución de la imagen se obtuvo directamente del programa INSIGHT 4G™, en tanto η se calculó mediante la ecuación (3.7), donde ε se obtiene con las mediciones de torque al utilizar la ecuación (3.8), donde N es la velocidad de rotación, ρ es la densidad del agua, V es el volumen de agua en el tanque y $\dot{T}$ es el torque generado por el impulsor.

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon = \frac{2\pi N \dot{T}}{\rho V} \quad (3.8)$$

Una vez que se tiene la información de estas variables ($\Delta = 1.3\text{mm}$ y $\eta = 4.6\mu\text{m}$), se determina el valor de C_s (0.16) con la ayuda de la Figura 3.10, donde se tiene graficada su variación con respecto a la relación de Δ/η (línea continua).

En la Figura 3.10 también se observa el comportamiento de diferentes aproximaciones de la constante de Smagorinsky (C_{s1} y C_{a1}), donde todas ellas tienden al valor de 0.17 conforme la relación Δ/η se va incrementando.

Tomando en cuenta las consideraciones antes mencionadas y con el propósito de calcular k y ε , se emplearon los archivos generados en el programa INSIGHT 4G™ al procesar las imágenes de partículas, los cuales están compuestos por la componente axial y radial de la velocidad instantánea de cada coordenada del área de análisis.

A estas componentes se les aplica la descomposición de Reynolds, ecuación (3.9), con el fin de obtener su parte fluctuante (u') y su parte promedio ($\bar{u}$). Cabe mencionar que este proceso se realiza para cada componente, en cada coordenada de los 400 campos de velocidad obtenidos por cada uno de los impulsores.

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.9)$$

Figura 3.10.- Variación de C_s (—), $C_{s\infty}$ (···), C_{s1} (—) y C_{a1} (--)
- donde Δ/Δ' de $\frac{1}{2}$ (X), $\frac{3}{4}$ (<) y 0.95 (o) [108].

Posteriormente se discretizaron las ecuaciones (3.3) y (3.6), implementando el método de diferencias finitas con esquema de diferencias centrales, para poder calcular k y ε con la información disponible. Debido a la gran cantidad de información que se requiere procesar se desarrolló un código en MATLAB®, con la intención de facilitar el cálculo de estas variables.

Sumado a lo anterior, al revisar la literatura se encontró una metodología conocida como resolución angular [22], [33], [34], [97], [105], la cual aplica la tercera descomposición a las componentes de la velocidad, ecuación (3.10). Esto para obtener la parte fluctuante “verdadera” (u'') de la velocidad instantánea (u) al sustraer el promedio de la velocidad para una determinada posición del impulsor ($\bar{u}|\theta$).

$$u'' = u - \bar{u}|\theta \quad (3.10)$$

Este procedimiento tiene el objetivo de quitar la parte periódica que se genera por el movimiento del impulsor, lo cual permitirá obtener la estimación de k y ε en diferentes planos de medición. Por este motivo se agregaron 17 planos adicionales, donde cada uno de los planos cuenta con cinco grados de separación ($\Delta\theta = 5^\circ$). En la Figura 3.11 se observan los planos para $\theta = 0^\circ$, $\theta = 30^\circ$ y $\theta = 60^\circ$, así mismo se hace notar que el plano a $\theta = 0^\circ$ es aquel donde el área de medición corta por la mitad el ancho del impulsor.

Figura 3.11.- Planos de análisis.

3.3.2.- Número de potencia, número de bombeo y eficiencia de bombeo

Una gran cantidad de las investigaciones relacionadas con los tanques de agitación, utilizan estos parámetros con el fin de describir de forma general el funcionamiento de un impulsor, debido a su simplicidad para ser calculados.

Siendo el primero, el encargado de facilitar de forma adimensional la cantidad de energía que requiere un impulsor para agitar un tanque a una velocidad de rotación determinada, ecuación (3.11) [32], [109], [110]. Donde **D** es el diámetro del impulsor, **N** es la velocidad de rotación, $\dot{T}$ es el torque generado por el impulsor y ρ es la densidad del fluido de trabajo.

$$N_p = \frac{2\pi N \dot{T}}{\rho N^3 D^5} \quad (3.11)$$

En tanto que el segundo, indica la capacidad que tiene el impulsor de bombear el fluido cuando se encuentra rotando a una determinada velocidad, ecuación (3.12) [32], [109], [110]. Obteniendo el flujo másico (**Q**) que pasa por una superficie circular que se encuentra a 3mm por debajo del impulsor utilizando la ecuación (3.13). Donde **D** es el diámetro del impulsor, **N** es la velocidad de rotación, **R** es igual al radio del impulsor, V_{axi} es la velocidad axial y **r** es la distancia el centro del impulsor al punto donde se tiene el valor de la velocidad.

$$N_q = \frac{Q}{ND^3} \quad (3.12)$$

$$Q = \int_0^R 2\pi V_{axi} r dr \quad (3.13)$$

La relación de estos dos números adimensionales es conocido como la eficiencia de bombeo, ecuación (3.13) [29], [111]. Siendo utilizada como un indicador de la razón de bombeo que proporciona un impulsor por unidad de potencia requerida, la cual se utiliza cuando el proceso de interés depende principalmente del bombeo y no de las fuerzas de corte generadas por el impulsor.

$$\eta_e = \frac{N_q}{N_p} \quad (3.13)$$

Estos tres números adimensionales permitirán comparar la energía requerida, la capacidad de bombeo y la eficiencia de bombeo que tiene cada uno de los impulsores de la Figura 3.5, para el mismo punto de operación.

Capítulo 4

Desarrollo numérico

4.1.- Simulación numérica

La dinámica de fluidos computacional se encarga de resolver numéricamente las ecuaciones que modelan el flujo isotérmico de un fluido homogéneo, es decir la ecuación de conservación de masa (4.1) y la ecuación de conservación de momento (4.2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \vec{f} \quad (4.2)$$

Sin embargo, este proceso es bastante complejo debido a la existencia de distintos tipos de errores, los cuales van desde errores de modelado (simplificaciones del fenómeno), hasta aquellos relacionados con la discretización del dominio computacional (calidad del mallado) y su solución, así como la complejidad inherente al modelado de la turbulencia.

Por tal motivo se recomienda ser precavido al momento de implementar esta herramienta, siendo necesario realizar una validación, un estudio de independencia de la malla y un análisis de convergencia en los resultados obtenidos [56], [112].

La técnica RANS es la de mayor uso para estudiar el fluido dentro de los tanques de agitación, debido a que tiene una buena relación entre la exactitud de su estimación y el costo computacional que implica.

Sin embargo, de un tiempo a la fecha la técnica LES ha incrementado su aplicación en este tipo de estudios, como resultado del avance en el campo de la computación, debido a que esta técnica requiere de un mayor número de recursos computacionales en comparación con la técnica anterior.

La simplificación en la técnica RANS se basa en descomponer en dos partes las variables a resolver, siendo una de estas la parte promedio y la otra la fluctuante. La primera es regularmente asociada a un promediado temporal y la segunda está relacionada con los modelos de turbulencia [112]. Al aplicar esta descomposición a la velocidad, se obtiene la ecuación (4.3), donde u es la velocidad instantánea, $\bar{u}$ es la velocidad promedio y u' es la velocidad fluctuante.

$$u = \bar{u} + u' \quad (4.3)$$

Al introducir esta descomposición en las ecuaciones (4.1) y (4.2), se obtienen las ecuaciones (4.4) y (4.5), en donde las variables representan los valores promediados.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (4.5)$$

El termino adicional $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$, representa los efectos de las fluctuaciones sobre el flujo promedio, el cual es denominado como el tensor de esfuerzos de Reynolds y es modelado para proporcionar un cierre de la ecuación (4.5).

Los modelos de turbulencia que emplea la técnica RANS, son ampliamente utilizados en la ingeniería debido al relativo bajo costo computacional que se requiere para caracterizar un fenómeno, a expensas de perder exactitud en los fenómenos turbulentos debido a su promediado temporal [27], [113], [114].

En el caso particular de k y ε , los modelos utilizados para obtener su estimación presentan limitaciones en su aproximación, debido a la formulación semi-empírica de estos. En el caso específico del modelo " $k - \varepsilon$ realizable" se agregan las ecuaciones (4.6) y (4.7), para modelar estas variables, donde las constantes utilizadas toman los valores mostrados en la Tabla 4.1.

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu + \mu_T}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right) + \rho \left(\frac{\mu_T}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial x_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon \right) \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu + \mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \rho \left(C_1 S \varepsilon - \frac{C_2 \varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \varepsilon}} \right) \quad (4.7)$$

Tabla 4.1.- Constantes del modelo de turbulencia κ-ε realizable [115].

Constantes		
$C_1 = \max \left[0.43; \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$	$C_2 = 1.9$	$\sigma_\kappa = 1$
$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$	$\eta = S \kappa / \varepsilon$	$\sigma_\varepsilon = 1.2$

4.2.- Simulación de los grandes remolinos

Esta técnica se utiliza para modelar flujos tridimensionales, turbulentos y no estacionarios, los cuales están constituidos por remolinos de escalas muy amplias, tanto de forma espacial como temporal. La cual resuelve los remolinos más grandes de manera directa y modela los más pequeños mediante un modelo a escala de submalla [116]. Teniendo la capacidad de estimar el comportamiento del flujo y presentar detalles tridimensionales, tanto de manera instantánea como promediada [49], [70], [117].

De acuerdo a la teoría de la cascada de energía de Kolmogorov, los remolinos más grandes llegan a ser del tamaño de la longitud característica, y transfieren su energía a los más pequeños sin pérdida alguna, siendo estos últimos los responsables de la disipación de la energía [118]–[120].

Sumado a esto, los remolinos más grandes se consideran anisotrópicos debido a la fuerte influencia que tienen por parte del mecanismo que introduce la energía al sistema. Sin embargo, conforme esa energía se transmite a los remolinos más pequeños, la orientación principal de movimiento tiende a disminuir, hasta el punto donde los remolinos más pequeños no muestran una orientación preferencial, por lo que se asume que tienen una estructura universal, es por esto que se consideran estadísticamente isotrópicos [118]–[120].

En el presente estudio el impulsor transfiere energía proveniente del motor al fluido, reflejándose en un incremento de la energía cinética, lo que conduce a la formación de remolinos de una escala equivalente al diámetro del impulsor, lo que se consideraría como los grandes remolinos. Para posteriormente transportar esa energía a remolinos de menor tamaño, repitiéndose este procedimiento hasta llegar a un punto, donde la fuerza inercial y viscosa son iguales, siendo este punto donde se considera que la energía se disipa en forma de energía termina.

En esta técnica las escalas más grandes se resuelven directamente y las más pequeñas se modelan, Figura 4.1, considerando que las primeras son dependientes del tipo de problema, teniendo una gran influencia de la geometría y las condiciones de frontera, no así las más pequeñas [121].

Figura 4.1.- Distribución de energía.

De esta forma, se supera el inconveniente de los modelos de turbulencia de la técnica RANS, donde todas las escalas de turbulencia son aproximadas mediante ecuaciones que requieren el ajuste de las constantes. Una ventaja de la simulación LES es la consideración de que las escalas más pequeñas son consideradas como isotrópicas, homogéneas y universales, haciéndolas más viables para modelar su comportamiento [121].

Además, al modelar las escalas pequeñas se evita el uso de mallas excesivamente finas, como las utilizadas en la simulación numérica directa, un aspecto directamente relacionado con el costo computacional.

Por otra parte, la técnica emplea un filtrado espacial que determina la frontera entre los tamaños de escala, la cual está directamente ligada al tamaño de la malla y a la cantidad de energía que se estará resolviendo, lo que se verá reflejado directamente en la calidad de la aproximación. En general se requiere de al menos un par de celdas en cada dirección para poder resolver un remolino, teniendo que la malla ideal se debe refinar en la zona de la pared para las tres direcciones, teniendo como objetivo obtener los valores $x^+ \approx 35-55$, $y^+ \leq 1$ y $z^+ \approx 15$ [122].

Una de las principales desventajas de esta técnica, se centra en el refinamiento de la malla que se requiere en la capa límite, por este motivo se han desarrollado técnicas híbridas. En las cuales, la parte interna de la capa logarítmica es aproximada con un modelo de pared, y la capa exterior de la capa límite se aproxima mediante la simulación de los grandes remolinos (WMLES por sus siglas en inglés - Wall Modelling in Large Eddy Simulation).

La ventaja de aplicar un modelo de pared, se enfoca en la relajación de los requerimientos de malla en su cercanía, lo cual tiene un impacto en el número total de elementos requeridos para discretizar el dominio computacional, produciendo una reducción del tiempo de cómputo y de los recursos computacionales requeridos [121].

Para obtener las expresiones que emplea la técnica LES, se aplica un filtro a las ecuaciones de continuidad y momento, este proceso permite separar los remolinos con escalas menores al tamaño del filtro, dando como resultado ecuaciones que gobiernan la dinámica de los grandes remolinos [18], [121].

La variable filtrada se expresa como se muestra en la ecuación (4.8), donde $\mathbf{D}$ es el dominio del fluido y $\mathbf{G}$ es la función de filtrado, la cual determinara el tamaño de los remolinos a resolver y es de tipo caja, la cual se expresa como se muestra en la ecuación (4.9), donde $\mathbf{V}$ es el volumen de la celda computacional [18], [72], [121].

$$\bar{\phi}(x) = \int_D \phi(x') G(x, x') dx' \quad (4.8)$$

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V & \text{si } x' \in v \\ 0 & \text{si } x' \text{ cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.9)$$

Al aplicar el proceso de filtrado a las ecuaciones de continuidad (4.1) y momento (4.2), considerando que el fluido es incompresible se obtienen las ecuaciones (4.10) y (4.11), respectivamente.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.11)$$

Donde τ_{ij} es el tensor de submalla que se obtiene del filtrado y se modela utilizando la hipótesis de Boussinesq, considerando que sus efectos se pueden aproximar por medio de la viscosidad turbulenta a escala de submalla (μ_t), ecuación (4.12), donde $\bar{S}_{ij}$ es el tensor de la tasa de deformación resuelto [122].

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (4.12)$$

Uno de los modelos más utilizados para estimar la viscosidad turbulenta es conocido como el modelo de Smagorinsky-Lilly, ecuación (4.13), donde L_s es la longitud de mezcla a escala de submalla y $|\bar{S}|$ se expresa como en la ecuación (4.14) [121].

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (4.13)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (4.14)$$

La técnica WMLES utiliza un modelo de turbulencia RANS, para resolver la parte interna de la capa logarítmica y una versión modificada de la técnica LES en la parte exterior. Modelando la viscosidad turbulenta con la expresión (4.15), donde d_w es la distancia de la pared, S es la tasa de deformación, $\kappa = 0.14$, $C_s = 0.2$ y y^+ es la distancia adimensional normal a la pared, ecuación (4.16) [121].

$$\mu_t = \min[(\kappa d_w)^2, (C_s \Delta)^2] \cdot S \cdot \{1 - \exp[-(y^+/25)^3]\} \quad (4.15)$$

$$y^+ = \frac{\rho U_\tau y}{\mu} \quad (4.16)$$

4.3.- Metodología numérica

El tanque de mezclado se discretizó con elementos tetraédricos utilizando el módulo denominado ANSYS® Meshing™. Para satisfacer los requerimientos de la malla en las zonas cercanas a la pared del impulsor, se aplicó un refinamiento de estos elementos, Figura 4.2.

Así mismo, se verificó que la calidad de la malla cumpliera con las recomendaciones de la guía del usuario del programa [123], donde especifica que se debe poner especial atención en dos parámetros, la distorsión y la ortogonalidad de la malla. Siendo que el primero no debe exceder un valor de 0.85 y el segundo no debe de tener valores menores a 0.20, parámetros que se cumplieron en las mallas utilizadas.

Figura 4.2.- Discretización espacial del impulsor.

Antes de iniciar la simulación LES y con el objetivo de lograr una convergencia de los resultados en un menor tiempo, se recomienda utilizar una solución inicial mediante una simulación RANS empleando un modelo de dos ecuaciones como mínimo [124]. En este caso se utilizó el modelo de turbulencia κ - ϵ realizable, debido a los buenos resultados obtenidos con anterioridad [125].

Cabe mencionar que para esta simulación se utilizó el modelo de marcos múltiples de referencia, debido a que se dividió el dominio computacional en dos partes, una designada como zona estacionaria y la otra como zona de referencia en movimiento, como se muestra en la Figura 4.3.

Figura 4.3.- Zonas múltiples de referencia [121].

Debido al movimiento del impulsor el problema es considerado como no estacionario, cuando se ve desde un marco de referencia estacionario. Sin embargo, si se analiza desde un marco de referencia en movimiento, el flujo alrededor del impulsor puede ser modelado de forma estacionaria con respecto a este marco de referencia [121].

Al utilizar este modelo, la ecuación de movimiento es modificada para incorporar términos adicionales de la aceleración, debido a la transformación que se realiza al pasar del marco de referencia estacionario al que se encuentra en movimiento [121].

La simulación con la técnica RANS se realizó en estado estacionario con una formulación SIMPLE, empleando un esquema de segundo orden hacia adelante (Upwind second order) para discretizar al momento, la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación. En el caso de la presión se utilizó un esquema de segundo orden y un esquema de Green-Gauss basado en el nodo (Green-Gauss Node Based) para el gradiente.

Se realizaron 7000 iteraciones para obtener un comportamiento estable de los residuales, los cuales se establecieron con un criterio de convergencia de 10^{-6} . Con el objetivo de acelerar la convergencia de los resultados al utilizar la técnica LES, se aconseja el incremento del número de iteraciones y la reducción del paso temporal, los cuales posteriormente serán justados conforme avanza la simulación [124].

Es importante mencionar que el paso temporal tiene un papel trascendental en la estabilidad de la solución, debido a esto se busca que cumpla con el criterio de estabilidad conocido como Número de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), ecuación (4.17).

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (4.17)$$

Donde u es la velocidad, Δt es el paso temporal y Δx es el tamaño de la celda con la que se discretiza el dominio computacional. Al cumplir la condición de $CFL \leq 1$, se considera que la simulación será estable, por lo cual el proceso iterativo no tendera a la divergencia [18], [126], [127].

En el presente estudio se utilizó la formula (4.18) [128], en la cual $\Delta\theta$ es el tamaño de la celda en coordenadas cilíndricas. Para calcular el valor del paso temporal, se consideró $\Delta\theta = (2\pi/360)$, una velocidad de rotación de 8.33rps (N) y un valor de **CFL**= 0.5, llevando a obtener un $\Delta t = 1.67E-04s$.

$$CFL = \frac{2\pi N\Delta t}{\Delta\theta} \leq 1 \quad (4.18)$$

Con base en lo anterior, se simuló una vuelta del impulsor con un paso temporal de $\Delta t = 3.33E-05s$, posteriormente dos vueltas con $\Delta t = 1.67E-04s$, seguido de 10 vueltas con $\Delta t = 3.33E-04s$, a partir de aquí se inició el muestreo de las variables para obtener un valor promedio que se determinó a partir de 10 vueltas más con el mismo paso temporal.

Cabe mencionar que al inicio de la simulación se establecieron 100 iteraciones por cada paso temporal, valor que se redujo conforme la simulación progresaba. En este caso la simulación se realizó en estado no estacionario con una formulación implícita de segundo orden (Bounded Second Order Implicit), empleando un esquema de diferencias centrales (Bounded Central Differencing) para la discretización del momento.

Además de un esquema de segundo orden para la presión y un esquema de Green-Gauss basado en el nodo para el gradiente, en conjunto con el algoritmo de acoplamiento conocido como (SIMPLE) y un criterio de convergencia de 10^{-5} . Las formulaciones, esquemas y algoritmos utilizados, se eligieron con base en la guía de ANSYS y en la revisión de diversas investigaciones realizadas por diferentes autores donde se utiliza esta técnica [76], [114], [124], [129]–[133].

4.3.1.- Energía cinética turbulenta y tasa de disipación

ANSYS® Fluent® al utilizar la técnica LES, no calcula de forma automática la generación y la disipación de la energía cinética turbulenta total. Es por esta razón que se deben definir funciones de campo personalizadas (cff por sus siglas en inglés – custom field function).

Las ecuaciones (4.19) y (4.20) se utilizaron en la presente investigación para presentar los contornos de estas variables, las cuales están constituidas por una parte que se calcula directamente y una parte que se modela. Donde μ_t es la viscosidad turbulenta, ρ es la densidad, C es la constante de submalla, Δ es la raíz cubica del volumen de la celda, ν es la viscosidad cinemática molecular y ν_{tur} es la viscosidad cinemática de submalla.

$$\kappa = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) + \left(\frac{\mu_t}{\rho \cdot C \cdot \Delta}\right)^2 \quad (4.19)$$

$$\varepsilon = (\nu + \nu_{tur})S^2 \quad (4.20)$$

4.4.- Estudio de la independencia de la malla

El estudio se realizó para determinar si el número de elementos del dominio computacional influye en la predicción de los resultados, o si estos se mantienen invariantes al refinar la discretización espacial. Cabe mencionar que este estudio se realizó utilizando la técnica RANS con base en dos motivos principalmente. El primero concierne con la metodología que se utiliza, la cual solo se reporta para este tipo de técnica, de acuerdo al conocimiento del autor.

A este respecto es importante recordar la diferencia que existe entre la técnica RANS y LES con relación al modelado de la turbulencia, siendo que en la primera se modelan todas las escalas, mientras en la segunda una parte se resuelve directamente y la restante se modela.

Como se mencionó en la sección anterior, esta división se obtiene al aplicar un filtro a las ecuaciones gobernantes, estando directamente relacionado el valor de dicho filtro con el tamaño de la malla utilizada para discretizar el dominio computacional. Por este motivo se considera que al implementar el mismo procedimiento realizado para la técnica RANS, en este caso se tendría una variación relacionada con la cantidad de turbulencia modelada a escala de submalla [79].

Dando como resultado que el punto donde la simulación con la técnica LES no muestra una variación en los resultados, no sería factible debido a la cantidad de elementos que compondría dicha discretización espacial. Este último punto está directamente relacionado con el segundo motivo, siendo este la limitante respecto al poder de cómputo que se requiere, para realizar las simulaciones con las discretizaciones del dominio computacional más finas.

En el presente estudio se decidió utilizar la metodología conocida como el índice de convergencia de la malla (GCI por sus siglas en inglés – Grid Convergence Index), para determinar la incertidumbre numérica al emplear un valor global del sistema, siendo en este caso el **Np**, el cual se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2.- Tamaño de las mallas.

Malla	PBT		U		V	
	Tamaño	Np	Tamaño	Np	Tamaño	Np
Burda (B)	1225647	1.3366	1317852	1.2886	1256631	1.2991
Intermedia (I)	3289419	1.314	3495922	1.273	3394457	1.272
Fina (F)	9165840	1.2997	10121434	1.2647	9756498	1.2568

Con esta metodología se determinó si la malla se encuentra en el rango asintótico, lo que indicaría la independencia de la solución con respecto al número de elementos que conforma la malla [134]–[136]. Esta metodología es ampliamente utilizada por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME por sus siglas en inglés - American Society of Mechanical Engineers) en las publicaciones de la revista de ingeniería de fluidos (Journal of Fluids Engineering).

A continuación, se presentará el procedimiento recomendado por Celik [137], siendo el primer paso la determinación del tamaño representativo de cada una de las mallas (h_i), ecuación (4.21), donde ΔV_i es el volumen y N es el número total de elementos que constituyen al dominio computacional.

$$h_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{1/3} \quad (4.21)$$

Enseguida se determina el factor de refinamiento de la malla (r), ecuación (4.22), el cual se recomienda que sea cercano a 1.3. Donde los subíndices 1 y 2 hacen referencia a la malla con más y con menos elementos, respectivamente. Posteriormente se determina el orden aparente del esquema en forma iterativa (p), ecuación (4.23), donde ϕ es la variable de interés que se obtiene de la simulación.

$$r = \frac{h_2}{h_1} \quad (4.22)$$

$$p = \frac{\left| \ln \left| \frac{\phi_3 - \phi_2}{\phi_2 - \phi_1} \right| + \ln \left(\frac{r_{21}^p - 1 \cdot \text{sgn} \left(\frac{\phi_3 - \phi_2}{\phi_2 - \phi_1} \right)}{r_{32}^p - 1 \cdot \text{sgn} \left(\frac{\phi_3 - \phi_2}{\phi_2 - \phi_1} \right)} \right) \right|}{\ln(r_{21})} \quad (4.23)$$

A continuación, se determina el error relativo (e_{21}), ecuación (4.24), para finalmente calcular el índice de convergencia de la malla (GCI_{21}^F), ecuación (4.25). Si la solución se encuentra en el rango asintótico de convergencia se debe cumplir la relación de la ecuación (4.26) [134], [136].

$$e_{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (4.24)$$

$$GCI_{21}^F = \frac{1.25 \cdot e_{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (4.25)$$

$$\frac{GCI_{32}}{r_{21}^p \cdot GCI_{21}} \approx 1 \quad (4.26)$$

Cabe mencionar que al calcular el índice de convergencia con la ecuación (4.25), se determina si la malla fina se encuentra en el rango asintótico, sin embargo, existe la posibilidad de calcular este parámetro para la malla burda [134], [135]. Lo anterior es propicio para la presente investigación debido a que la técnica LES utiliza una cantidad considerable de recursos computacionales. A este respecto el índice de convergencia para la malla burda se calcula con la ecuación (4.27).

$$GCI_{32}^B = \frac{1.25 \cdot e_{32} \cdot r_{32}^p}{r_{32}^p - 1} \quad (4.27)$$

Asimismo con el objetivo de verificar que la metodología del GCI pueda ser aplicada, algunos investigadores recomiendan calcular la condición de convergencia aparente, ecuación (4.28) [138], [139]. Donde de acuerdo al valor de R se pueden tener 4 tipos de resultados, $R > 1$ divergencia monotónica, $1 > R > 0$ convergencia monotónica, $0 > R > -1$ convergencia oscilatoria y $R < -1$ divergencia oscilatoria. Donde se busca tener una convergencia monotónica para emplear el método del GCI [138], [139].

A su vez, la similitud entre los valores del orden aparente y el orden utilizado en la simulación, se puede considerar como un indicador de que la malla se encuentra en el rango asintótico, de acuerdo con lo reportado por algunos investigadores [137], [139], [140].

$$R = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\phi_3 - \phi_2} \quad (4.28)$$

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados de la malla **Burda** donde el orden aparente es similar al empleado en la simulación (2^{do} orden), aparte se cumple con la condición de convergencia aparente, aunado a que esta se encuentra en el rango asintótico, debido a que valor calculado es muy cercano a 1.

Cabe mencionar que los resultados producidos por otras mallas, cumplían de forma parcial con estas características o solo lo hacían para algunos de los impulsores.

Tabla 4.3.- Características de las mallas.

Malla	PBT	U	V
p	1.4162	1.9886	1.8595
R	0.6460	0.5562	0.5641
$GCI_{(B)-(I)}$	0.0572	0.0331	0.0577
$GCI_{(I)-(F)}$	0.0363	0.0175	0.0316
$\frac{GCI_{(B)-(I)}}{r_{(I)-(F)}^p \cdot GCI_{(I)-(F)}}$	0.9890	0.9930	0.9880

Por tal motivo y con la intención de reducir la información presentada, solo se muestran los resultados de la malla que cumple con todas las características recomendadas para los tres impulsores utilizados en esta investigación. Lo que condujo a adoptar la malla **Burda** para realizar la simulación con la técnica LES.

De forma adicional y con el objetivo de incrementar el conocimiento respecto a la variación en la distribución, de la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación, al incrementar el número de elementos de la malla, en la siguiente sección también se presenta la información obtenida al utilizar la malla denominada **Intermedia**.

Capítulo 5

Resultados

5.1.- Comparación entre resultados experimentales y numéricos

A continuación, se presenta la comparación de los resultados obtenidos de forma experimental y numérica. Para estos últimos, los índices 1 y 2 hacen referencia a la malla utilizada en la simulación, siendo estas la malla **Burda** e **Intermedia** de la Tabla 4.2, respectivamente.

5.1.1.- Número de potencia, número de bombeo y eficiencia de bombeo

En la Figura 5.1 se muestran los valores del número de potencias para los tres impulsores, donde se observa que los resultados de las simulaciones concuerdan razonablemente con los datos experimentales.

Figura 5.1.- Número de potencia.

De los cuales se determinó que la menor diferencia para el impulsor PBT, se tiene con el caso LES1 (2%) y la mayor con el caso RANS1 (5%). Para el impulsor U la menor diferencia es para el caso LES2 (1%) y la mayor es para el caso LES1 (6%). Para el impulsor V la menor diferencia es para el caso LES1 (2%) y la mayor para el caso RANS1 (6%).

El número de bombeo, Figura 5.2, presentan una buena concordancia entre los valores. En este caso la menor y mayor diferencia para el impulsor PBT se tiene con los casos RANS1 y LES2, con una variación del <1% y 4%, respectivamente. Para el impulsor U se tiene que los casos RANS1 y LES1 tiene una diferencia del 2% y 4%, respectivamente. El impulsor V muestra una diferencia de 1% y 9% para los casos RANS1 y LES2, respectivamente.

Figura 5.2.- Número de bombeo.

La eficiencia de bombeo, Figura 5.3, también muestra una buena concordancia entre los resultados. En este caso el impulsor PBT manifiesta una diferencia del 1% y 4% de discrepancia en los casos LES1 y RANS1, respectivamente. En tanto la menor y mayor diferencia para el impulsor U se tiene para los casos RANS1 y LES1, con una variación del 3% y 10%, respectivamente. El impulsor V tiene discrepancia del 6% y 12% en los casos LES1 y LES2, respectivamente.

En la Tabla 5.1 se observa la variación del N_p , N_q y η_e obtenida de forma experimental por diferentes investigadores, en todos los casos se trata de un impulsor de paletas inclinadas, con una relación $D/T = 1/3$, que genera un flujo con dirección al fondo del tanque, para los cuales se pueden obtener más datos de cada una de las configuraciones en sus correspondientes referencias.

Figura 5.3.- Eficiencia de bombeo.

La tabla muestra que aun para el mismo impulsor se puede obtener un amplio rango de estos números, debido a que cada variación en la configuración del sistema y de su punto de operación influye de forma directa en estos, lo cual remarca la importancia de utilizar el mismo sistema y punto de operación, para asegurar que la variación de estos se debe únicamente a la modificación geométrica que se aplicó en las paletas del impulsor.

Tabla 5.1.- Comparación de resultados con los resultados de otros investigadores

Características de los impulsores				
	N_p	N_q	η_e	D/T
PBT	1.26	0.79	0.63	1/3
U	1.20	0.72	0.60	1/3
V	1.20	0.77	0.64	1/3
Ranade et al. [23]	2.10	0.94	0.44	1/3
Jaworski et al. [141]	1.70	0.73	0.42	1/3
Aubin et al. [29]	1.93	0.75	0.38	1/3
Wu et al. [30]	1.22	0.76	0.62	1/3
Chapple et al. [32]	1.27	-	-	1/3

5.1.2.- Campos de velocidad

En las figuras 5.4, 5.6, 5.7, 5.9 y 5.10 se muestran los contornos obtenidos para el plano a 60°. Esto se realizó para simplificar la presentación de los resultados. Sin embargo, en el apéndice se pueden consultar los contornos de todos los planos de medición obtenidos de forma experimental y con la técnica LES, para los tres impulsores de la investigación.

Las coordenadas de todos los contornos presentados en esta investigación se normalizaron utilizando el diámetro del tanque de agitación (**T**). Por su parte, la velocidad axial se normalizó empleando la velocidad en la punta del impulsor PBT (**V_{punta}**).

La Figura 5.4 muestra las zonas de alta velocidad axial concentrarse en su mayoría por debajo de los impulsores, lo cual era de esperarse debido a que en esta zona es donde se transfiere mayor energía cinética, debido a que la principal dirección de bombeo del impulsor es la axial con un sentido hacia el fondo del tanque.

Por otra parte, se identificaron dos zonas de baja velocidad axial, una en la parte inferior del núcleo del impulsor y la otra muy cerca de la punta. En los contornos se advierte un incremento de la zona de alta y baja velocidad, al comparar los resultados de la técnica LES con los experimentales, tendiendo a incrementarse con el aumento del número de elementos de la malla.

En el caso de la técnica RANS se tiene una mejor afinidad con respecto al PIV, y el incremento del número de elementos no muestran un cambio significativo en los contornos. Estos datos permiten determinar que la técnica RANS es la opción viable para estimar la velocidad tanto por la afinidad de los resultados, así como por el costo computacional que este conlleva. Debido a que el incremento implícito en el uso de la técnica LES no lo hace una opción factible.

En la figura 5.5 se muestran los resultados de la velocidad axial que obtuvieron Gabriele et al. [22] para un impulsor de cuatro paltas inclinadas a 45°, en los cuales se puede observar la similitud de la distribución de la velocidad en la zona próxima a la paleta, observándose que los valores máximos están por debajo de esta, así como la existencia de unas zonas de baja velocidad en la parte central del tanque y en la zona cercana a la punta de la paleta. Para obtener más datos de la configuración del sistema y del punto de operación, se puede consultar la referencia correspondiente.

Figura 5.4.- Velocidad axial – resultados experimentales y numéricos en el plano a 60°.

Figura 5.5.- Velocidad axial - (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° y (d) 45° [22].

5.1.3.- Energía cinética turbulenta

En la Figura 5.6 se muestran los contornos de la energía cinética turbulenta, la cual fue normalizada utilizando el cuadrado de la velocidad en la punta del impulsor (V_{punta}^2). En las imágenes se distingue que la zona de alta energía en su mayor parte se presenta en la parte inferior de cada impulsor.

Al comparar los resultados del PIV y la técnica LES, estos últimos sobreestiman la energía en todos los planos, tendencia que se incrementa al utilizar un mayor número de elementos en la malla. Por su parte los resultados de la técnica RANS presentan una subestimación de la energía, así mismo, se aprecia que para los resultados numéricos en algunos planos se presentan zonas de baja energía frente al impulsor, las cuales no se observan en los resultados experimentales.

Figura 5.6.- Energía cinética turbulenta – resultados experimentales y numéricos en el plano a 60°.

Figura 5.7.- Distribución de la energía cinética turbulenta en el plano a 60° utilizando diferentes escalas.

En la Figura 5.7 se muestran los contornos para el plano a 60° , con diferentes escalas para cada técnica utilizada. El objetivo es verificar si la distribución espacial de la energía cinética obtenida de forma experimental, es reproducida por las técnicas numéricas, en la figura se observa una gran variación en la distribución de los contornos obtenidos con las técnicas numéricas con respecto a la experimental, dejando en claro que la modelación de la energía cinética turbulenta aun representa un reto por superar.

Se observa que la técnica WMLES no aporta una clara ventaja en el cálculo de la energía cinética turbulenta, con respecto a la técnica RANS. Sin embargo, es importante mencionar que existe una variación importante del resultado, al aumentar el número de elementos de la malla para la técnica LES, por lo que cabe la posibilidad que un mayor refinamiento del dominio computacional y la simulación de un mayor número de giros del impulsor, conduzca a mejorar la aproximación de la energía cinética.

Figura 5.8.- Energía cinética turbulenta – (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° y (d) 45° [22].

En la figura 5.8 se muestran los resultados de la energía cinética turbulenta que obtuvieron Gabriele et al. [22], en los cuales se puede observar que los valores máximos se generan en la zona que se encuentra alrededor de la punta de la paleta, así como la existencia de unas zonas de baja energía en la parte central del tanque, siendo estas unas distribuciones similares a las obtenidas en la presente investigación. Para obtener más datos de la configuración del sistema y del punto de operación, se puede consultar la referencia correspondiente.

5.1.4.- Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta

En la Figura 5.9 se muestran los contornos de la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, donde la normalización se realizó con $N^3 D^2$. En los contornos obtenidos mediante PIV muestran que las zonas de alta disipación se generan alrededor del impulsor y su rotación conduce a estas zonas a trasladarse con dirección al fondo del tanque.

Los resultados de la técnica LES muestran que el área de las zonas de alta disipación alrededor del impulsor tiende a incrementarse, no obstante, en el resto del área se observa una subestimación de la disipación. Al incrementar el número de elementos del dominio computacional, también aumentan los valores de la disipación, conduciendo a una mejor aproximación de la zona por debajo del impulsor, con todo es evidente que la disipación sigue siendo subestimada en su mayoría.

Por su parte los resultados de la técnica RANS muestran una sobrestimación de los valores de la disipación para los tres impulsores en cada uno de los planos. En este caso al incrementar el número de elementos de la malla no se observa un cambio significativo en las predicciones.

En la Figura 5.10 se muestran los contornos a 60° con diferentes escalas para comparar la distribución de la tasa de disipación. En este caso se observa que la distribución obtenida por la técnica LES, presenta cierta similitud con respecto a la experimental, en tanto el incremento del número de elementos de la malla para esta técnica, conduce a reducir la subestimación de estos. Lo anterior apunta a obtener una mejor aproximación de este parámetro si se continúa incrementando la refinación de la malla.

Figura 5.9.- Tasa de disipación – resultados experimentales y numéricos en el plano a 60°.

Figura 5.10.- Distribución de la tasa de disipación en el plano a 60° utilizando diferentes escalas.

En la figura 5.11 se muestran los resultados de la tasa de disipación que obtuvieron Gabriele et al. [22], en los cuales se puede observar la similitud de la distribución con respecto a la presente investigación, ya que en estos contornos se presenta una zona de máxima disipación en el área por debajo de la punta de la paleta. Para obtener más datos de la configuración del sistema y del punto de operación, se puede consultar la referencia correspondiente.

Figura 5.11.- Tasa de disipación – (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° y (d) 45° [22].

5.2.- Comparación de los resultados de la técnica PIV entre impulsores

La Figura 5.1 muestra que los dos impulsores con surcos reducen el número de potencia alrededor de un 5% con respecto al impulsor PBT. Por su parte, la Figura 5.2 muestra un decremento para los impulsores U y V alrededor del 9% y 3% del número de bombeo, respectivamente.

Lo anterior condujo a obtener una reducción de la eficiencia de bombeo para el impulsor U del 4% y un incremento de 2% para el impulsor V en comparación con el impulsor PBT, Figura 5.3. Adicionalmente al comparar los valores obtenidos para el impulsor PBT ($N_p = 1.26$ y $N_q = 0.79$) en la presente investigación, con los reportados en la tabla 5.1, se observa que estos se encuentran dentro del rango reportado.

A su vez las figuras 5.12 - 5.14 muestran los contornos de los parámetros obtenidos con los datos del PIV, donde para simplificar la presentación de los resultados únicamente se tienen los contornos de los planos a 0° , 30° y 60° . Sin embargo, en el apéndice pueden ser consultados los contornos de los 18 planos de medición.

En los contornos de velocidad axial, Figura 5.12, se observa la generación de una zona de alta velocidad axial alrededor de la paleta, para los tres impulsores, presentando un movimiento de traslación con dirección al fondo del tanque como consecuencia de la rotación de este, siendo mayor el área de esta zona en todos los planos para el impulsor PBT en comparación con los impulsores U y V.

Figura 5.12.- Velocidad axial - PIV.

Sumado a lo anterior, se muestran dos zonas de baja velocidad, una localizada debajo del núcleo del impulsor y otra en la proximidad de la punta de la paleta, observándose que la primera de estas tiene una mayor área en los impulsores U y V, lo que indica que esta zona de baja velocidad se incrementa al utilizar surcos en las paletas del impulsor.

Al comparar los contornos de la Figura 5.5 y 5.12, se observa para todos los casos, que en el plano a 0° la zona de velocidades máximas (color rojo), cubre un área mayor y conforme rota el impulsor esta tiende a modificarse, por otra parte, en ambas figuras se aprecia la zona de baja velocidad que se localiza alrededor de la punta de la paleta.

En la Figura 5.13 se muestran los contornos de la energía cinética turbulenta para los tres impulsores, donde se observa que la zona de alta energía se genera en la punta de la paleta y presenta un movimiento hacia el fondo del tanque conforme el impulsor gira. Por otra parte, se muestra un incremento de la energía para el impulsor U al compararlo con el impulsor PBT en la mayoría de los planos de medición, en tanto el impulsor V muestra unos contornos muy parecidos en comparación al impulsor PBT, donde solo en algunos planos muestra un ligero incremento de la energía.

En este caso al comparar las figuras 5.8 y 5.13, se observa que en todos los casos la zona de mayor energía cinética turbulenta, se genera en la punta de la paleta y conforme gira el impulsor esta tiende a desplazarse hacia el fondo del tanque.

En la Figura 5.14 se muestran los contornos de la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, donde se observa que la mayor tasa de disipación se genera alrededor de la punta de la paleta para los tres impulsores. Así mismo, los impulsores U y V presentan otra zona de alta disipación en el surco que se localiza en la parte media de la paleta, siendo para el impulsor U una zona que tiende a incorporarse a aquella que se genera en la punta, debido al movimiento del impulsor que conduce a ambas con dirección al fondo del tanque.

En este caso, al comparar las figuras 5.11 y 5.14, se observa que la generación de la mayor tasa de disipación se produce en la zona de la paleta y que esta se desplaza con dirección al fondo del tanque con el giro del impulsor, sumado a esto, se observa una similitud en la tasa de disipación que se genera en el borde inferior de la paleta del impulsor PBT.

Figura 5.13.- Energía cinética turbulenta - PIV.

Por su parte, esta zona en el impulsor V tiende a disiparse con el movimiento del impulsor, de forma similar a lo que ocurre para el impulsor PBT.

Los dos impulsores con surcos muestran un ligero incremento en la tasa de disipación con respecto al impulsor PBT, así como una mayor concentración de la zona de alta disipación en algunos planos de medición. En este caso las zonas de baja disipación se encuentran por arriba y al frente de los impulsores, las cuales varían en su tamaño en función del impulsor, pero sin presentar una diferencia considerable.

Figura 5.14.- Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta - PIV.

5.3.- Mediciones adicionales

De forma adicional y con la intención de obtener un mayor conocimiento de las características que producen los impulsores con surcos, en esta sección se agregaran los contornos de otras variables en los mismos planos de medición, así como en planos con una diferente localización.

Es importante mencionar que debido a circunstancias externas (reubicación de laboratorio, huelga y pandemia) la cantidad de información de la presente sección es limitada, sin embargo, se consideró que esta puede mostrar cierta tendencia que conduzcan a la motivación de nuevas investigaciones.

En las figuras 5.15 y 5.16 se presentan los contornos de vorticidad, la cual se calculó utilizando la ecuación (5.1) [22], [132], en este caso la normalización se realizó con la frecuencia de paso de la paleta (ω_{rot}). Se observa que los surcos de los impulsores U y V, generan nuevas zonas de vorticidad en la parte central y en la punta de la paleta, las cuales tienen valores negativos, indicando un sentido de giro contrario a aquellas similares a las producidas por el PBT.

$$\omega_z = \frac{\partial u_{axi}}{\partial x} - \frac{\partial u_{rad}}{\partial y} \quad (5.1)$$

Figura 5.15.- Vorticidad en los planos 0°, 15° y 30° [90].

Para el impulsor U, la nueva zona de alta vorticidad que se genera en la punta tiende a desaparecer al ser desplazada en sentido descendente, posicionándose entre dos zonas de alta vorticidad de valores positivos, en el intervalo de $\theta = 30^\circ$ a $\theta = 60^\circ$. Se considera que esto sucede por la interacción de las zonas de alta vorticidad con sentido opuesto. Debido al decremento mostrado por la zona de vorticidad positiva, el cual es más marcado en comparación con los otros impulsores.

En el caso del impulsor V, la zona de alta vorticidad localizada en la punta y con magnitud negativa, se mantiene durante un mayor número de planos de medición, así como la zona de magnitud positiva, por lo que se considera que aun estando próximas la una de la otra, tiene una menor interacción en comparación con lo visto para el impulsor U.

Figura 5.16.- Vorticidad en los planos 45°, 60° y 75° [90].

En la Figura 5.17 se presentan los contornos de los vórtices utilizando el criterio λ_2 , los cuales se obtienen al calcular el segundo eigenvalor del tensor $S^2 + \Omega^2$, donde S y Ω son la parte simétrica y antisimétrica del tensor del gradiente de velocidad, respectivamente [79], [142]–[145]. Este criterio tiene la ventaja de delimitar de forma clara el número de vórtices que genera cada uno de los impulsores, así como su evolución con respecto al movimiento del impulsor.

La Figura 5.17 muestra que los vórtices generados por los impulsores U y V se incrementan en comparación con los producidos por el impulsor PBT, en la zona que se encuentra por debajo de la paleta, así mismo se observa que los contornos de vorticidad de mayor área, son los que se generan en la punta de la paleta para los tres impulsores.

Figura 5.17.- Contornos de los vórtices - criterio λ_2 ($\lambda_2 = -400s^{-2}$) [90].

Adicionalmente se logró realizar la medición de dos planos que cortan la paleta del impulsor de forma transversal, posicionando al plano MP en la parte central y al plano TP en la zona de la punta de la paleta, Figura 5.18.

Debido a que el cuerpo del impulsor interfiere con la iluminación del área de análisis, para obtener la distribución de los contornos en estos planos se realizó una segunda medición, posicionando el láser en el sentido opuesto, como se indica en la Figura 5.18.

Figura 5.18.- Localización de los planos MP y TP [146].

De esta forma la información faltante que tiene el plano al posicionar al láser en la dirección 1, esto es la región de sombra de la Figura 5.19 (a), es completada por la región encerrada entre líneas discontinuas, la cual se obtiene cuando el láser se posiciona con la dirección 2, Figura 5.19 (b).

Figura 5.19.- Medición con diferente posicionamiento del láser, a) dirección 1 y b) dirección 2 [146].

En la Figura 5.20 se presentan los contornos de velocidad axial para el impulsor PBT y el impulsor V únicamente, tanto en el plano MP como en el PT. En el plano MP se observa una zona de alta velocidad alrededor del impulsor PBT, la cual es considerablemente más grande que la generada por el impulsor V, por lo que se considera que esta distribución muestra que en esta zona es donde más flujo es bombeado hacia el fondo del tanque por parte del impulsor PBT.

Por su parte la distribución en el plano TP muestra un comportamiento contrapuesto, por lo que se considera que en este el impulsor V bombea más fluido que el impulsor PBT. Sumado a lo anterior, también se considera que este comportamiento está relacionado con el desprendimiento del flujo que se genera en estas posiciones de la paleta de cada uno de los impulsores.

Figura 5.20.- Velocidad axial en el plano MP y TP [146].

La distribución de vorticidad para el plano MP de la Figura 5.21, muestra que el impulsor V produce un incremento de las zonas que están por detrás de la paleta, así como una nueva zona de vorticidad al frente de la misma, a la cual se le identifico con el número dos. Adicionalmente a esto se presenta un incremento visible para las zonas tres y cuatro, lo cual se considera que se debe al mayor desprendimiento del fluido que se produce en este plano con respecto al impulsor PBT, como se mencionó anteriormente.

Aunado a esto, se considera que existe una zona de vorticidad en la pared de succión del impulsor V, sin embargo, debido los surcos no es posible capturar esta información en su totalidad, no obstante, se pueden apreciar unas pequeñas zonas de vorticidad con sentido de rotación opuesto.

Por su parte el plano TP, muestra un decremento de las zonas de vorticidad que se desprenden de la superficie de succión de la paleta, siendo estas las que generan el desprendimiento de estelas en la punta del impulsor.

Figura 5.21.- Vorticidad en el plano MP y TP [146].

Por lo que se considera que esta característica puede estar relacionada con el decremento del número de potencia que se registró para los impulsores con surcos en la Figura 5.1. Sumado a esto, se considera que el decremento de la vorticidad en el plano TP, se debe a la división del desprendimiento del fluido, esto es que una parte se desprende en la parte central de la paleta y la otra sucede en la punta de esta, lo que ocasiona que la estela que se desprende de la punta del impulsor V sea menor que aquella que se desprende del impulsor PBT.

Con base en lo antes mencionado, se considera que los surcos en las paletas del impulsor pueden conducir a múltiples beneficios en diversos procesos donde se emplea el tanque de agitación.

Tomando en cuenta que el micromezclado mejora su desempeño al incrementarse la tasa de disipación, así como su influencia directa en las reacciones químicas debido a que ambos se llevan a cabo en la escala molecular [147], [148], se considera que los impulsores con surcos tienen altas posibilidades de intensificar los procesos que lleven a cabo una reacción química.

Consiguiendo presentar una mejora en los reactores biológicos, donde el micromezclado tiene una gran influencia en el proceso de crecimiento de microorganismos. Por ejemplo, en los fermentadores donde la deficiencia del micromezclado puede ocasionar una limitación del oxígeno que requieren los microorganismos.

También es importante el conocer la distribución tanto de la energía cinética turbulenta como de su tasa de disipación, ya que esta nos indicara la zona más factible para realizar una mezcla, una transferencia de masa o de calor, lo que conducirá a obtener mejores diseños y operaciones en biorreactores [10].

A este respecto, el concepto de daño celular en este tipo de reactores está directamente relacionado con la tasa de disipación de la energía. Siendo importante su distribución, ya que no tendrá los mismos efectos cuando una cantidad dada de energía es disipada en un pequeño volumen, que cuando esa misma cantidad se disipa en una zona de mayor dimensión [10]. El conocimiento de este tipo de distribución permitiría conocer el nivel de daño que una célula puede llegar a experimentar al utilizar un determinado impulsor.

Por otra parte, puede presentar efectos benéficos cuando se agregan aditivos o nanopartículas para mejorar para la producción de metano, además de una posible estimulación de las bacterias en la producción de biogás [149]–[151].

Aunado a esto, se considera que el incremento de la vorticidad debido a los surcos tendría un impacto positivo en el macromezclado, presentando una mejor homogenización de las sustancias de trabajo que contenga el tanque de agitación.

5.4.- Conclusiones

Se observó que los resultados numéricos del N_p presentan una variación entre el 1% y 6% con respecto a los experimentales. En el caso del N_q la variación está entre el 1% y 9%. Debido a esto se considera que la estimación producida por ambas técnicas concuerda con el valor obtenido experimental.

Las distribuciones de los contornos numéricos de la velocidad axial presentaron una concordancia cualitativa con respecto a los experimentales. Sin embargo, en la parte cuantitativa, se observó una sobreestimación en los valores al utilizar la técnica LES, por lo cual se considera que la predicción de la técnica RANS es mejor en este caso.

En base a lo anterior, se recomienda que si la investigación numérica que se realiza en el tanque de agitación está relacionada con estos parámetros (N_p , N_q y V_{axi}), es mejor utilizar la técnica RANS, debido a que el incremento del costo computacional al utilizar la técnica LES en la presente investigación, no mostró un aumento significativo en la exactitud de las aproximaciones.

En el caso de la distribución de la energía cinética turbulenta la técnica LES muestra una sobreestimación de los contornos de la energía, mientras que la técnica RANS presenta una subestimación con respecto a la distribución experimental. Además, no se observó una clara ventaja del uso de la técnica LES para el cálculo de esta variable.

Para la distribución de la tasa de disipación se tiene el comportamiento contrario. La técnica LES presenta subestimación de los contornos, mientras la técnica RANS muestra una sobreestimación de estos. No obstante, los contornos que se obtienen con la técnica LES presentan una mejor concordancia de forma cualitativa con los obtenidos experimentalmente.

En los resultados se observa que los contornos obtenidos con la técnica LES, presentan una gran variación en sus magnitudes al modificar la densidad de la malla, lo cual era de esperarse, debido al cambio del tamaño del filtro que se tiene como resultado de la refinación de la malla.

Si bien no existe una metodología establecida para llevar a cabo un estudio de independencia de malla para esta técnica, se aprecia que el incremento del número de elementos conduce a una reducción de la subestimación de la tasa de disipación de la

energía cinética turbulenta. Sin embargo, no se muestra esta misma tendencia para la energía cinética turbulenta.

Debido a esto, se considera que el estudio en la variación del número de elementos si bien es de interés, en caso de realizar futuras investigaciones se debe realizar con precaución, ya que no se han obtenido resultados claros a este respecto.

Sin embargo, el poder computacional requerido sí se incrementa de forma importante, ya que en el presente estudio la simulación con la malla **Intermedia** requirió de dos meses de cómputo para obtener los resultados que se presentaron, esto representó un incremento del 150% del tiempo en relación con la malla **Burda**.

Por su parte, los contornos de la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación obtenidos con la técnica de la velocimetría por imágenes de partículas, muestra que la implementación de los surcos en las paredes de las paletas, en forma de U y V, son un mecanismo efectivo para modificar su distribución.

Aunado a esto, también se observó un cambio en la cantidad y posición de los vórtices que se generan al desprenderse el fluido de la superficie de la paleta.

Lo que indicaría que esta nueva distribución tiene altas probabilidades de mejorar una diversidad de procesos. Teniendo por ejemplo que el incrementar la tasa de disipación se logra intensificar las reacciones químicas que se pudiesen llevar dentro del tanque.

En cambio, una distribución donde se reduzcan los gradientes de la tasa de disipación favorecerá los procesos biológicos donde se utilizan células, como consecuencia de reducir la energía disipada de forma concentrada.

Productos

Artículos

Chemical Engineering Journal 374 (2019) 1138–1152

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Engineering Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cej

PIV and dynamic LES of the turbulent stream and mixing induced by a V-grooved blade axial agitator

Israel González-Neria^a, Alejandro Alonzo-García^{b,*}, Sergio A. Martínez-Delgadillo^c, Víctor X. Mendoza-Escamilla^d, Juan Antonio Yáñez-Varela^a, Patrick G. Verdin^e, Gabriela Rivasdeneyra-Romero^f

^a Posgrado en Ing. de Procesos, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, CP 07740 México D.F., Mexico
^b CONACYT-Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Carretera Chapultepec - Gd del Carmen 408, C. P. 24150 Ciudad del Carmen, Campeche, Mexico
^c Depto. Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, CP 07740 México D.F., Mexico
^d Depto. Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, CP 07740 México D.F., Mexico
^e Energy & Power, School of Water, Energy and Environment, Cranfield University, Bedfordshire MK43 0AL, UK
^f Universidad del Istmo, Ciudad Universitaria S/N, Barrio Santa Cruz 4^a Secc., San Domingo Tehuantepec, Oaxaca, Mexico

Chemical Engineering Journal 358 (2019) 425–435

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Engineering Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cej

Analysis of the turbulent flow and trailing vortices induced by new design grooved blade impellers in a baffled tank

Sergio A. Martínez-Delgadillo^{a,*}, Alejandro Alonzo-García^b, Víctor X. Mendoza-Escamilla^c, Israel González-Neria^d, J. Antonio Yáñez-Varela^d

^a Depto. Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, CP 02200 México, D.F., Mexico
^b CONACYT-Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Av. Playa pie de la cuesta 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Querétaro, Querétaro, Mexico
^c Depto. Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, CP 02200 México, D.F., Mexico
^d Posgrado en Ing. de Procesos, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, CP 02200 México, D.F., Mexico

Brazilian Journal of Chemical Engineering

ISSN 0104-6632
Printed in Brazil
www.abeq.org.br/bjche

Vol. 36, No. 01, pp. 361–382, January–March, 2019
<https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190361s20180091>

ON THE PERFORMANCE OF DIFFERENT RANS BASED MODELS TO DESCRIBE THE TURBULENT FLOW IN AN AGITATED VESSEL USING NON-STRUCTURED GRIDS AND PIV VALIDATION

Alejandro Alonzo-García¹, Víctor X. Mendoza-Escamilla², Sergio A. Martínez-Delgadillo^{3*}, Israel González-Neria³, Claudia del C. Gutiérrez-Torres⁴ and José A. Jiménez-Bernal⁴

Congresos

Productos de colaboraciones en otros proyectos

Chemical Engineering Journal 399 (2018) 1240–1250

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Engineering Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cej

Experimental and numerical evaluation of the performance of the electrochemical reactor operated with static and dynamic electrodes in the reduction of hexavalent chromium

Juan A. Yáñez-Varela^a, Alejandro Alonzo-García^b, Israel González-Neria^a, Víctor Mendoza-Escamilla^c, Gabriela Rivadeneyra-Romero^d, Sergio A. Martínez-Delgadillo^{e,*}

^a Posgrado en Ing. de Procesos, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, 07740 México D.F., Mexico
^b CONACYT-Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Carretera Champotón-Cd. del Carmen 408, Ciudad del Carmen, Campeche 24150, Mexico
^c Depto. Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, 07740 México D.F., Mexico
^d Universidad del Istmo, Ciudad Universitaria S/N, Barrio Santa Cruz 4^a Secc., Sta. Domingo Tehuantepec, Oaxaca, Mexico
^e Depto. Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, 07740 México D.F., Mexico

Chemical Engineering Journal 399 (2018) 1179–1208

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Engineering Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cej

CFD and experimental validation of an electrochemical reactor electrode design for Cr(VI) removal

Juan A. Yáñez-Varela^a, Víctor X. Mendoza-Escamilla^b, Alejandro Alonzo-García^c, Sergio A. Martínez-Delgadillo^{d,e}, Israel González-Neria^a, Claudia Gutiérrez-Torres^c

^a Posgrado en Ing. de Procesos, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, CP 07740 México D.F., Mexico
^b Depto. Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, CP 07740 México D.F., Mexico
^c CONACYT-Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Av. Pío Jara de la cuesta 702, Desarrollo San Pablo, 76125, Querétaro, Qro., Mexico
^d Depto. Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, CP 07740 México D.F., Mexico
^e Instituto Politécnico Nacional, SEP-ESIME Zacateco, U.P. Adolfo LópezMateos, Edificio 5, 3er Piso, Col.Lindavista, 07738 México, DF, Mexico

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la OBRA cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES:	ALONZO GARCIA ALEJANDRO GONZALEZ NERIA ISRAEL
TITULO:	POROSITY-CALCULATOR V.1.0
RAMA:	PROGRAMAS DE COMPUTACION
TITULAR:	CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Recomendaciones para futuros trabajos

Utilizar una malla con más elementos para calcular la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, tomando en cuenta la limitante del poder y costo computacional asociado.

Investigar la influencia del tamaño del marco de referencia móvil de la malla, en el cálculo de la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación, en las zonas donde se presentan los gradientes más altos.

Incrementar el número de vueltas del impulsor para obtener los promedios temporales de los contornos.

Analizar otras configuraciones de los surcos en la superficie del impulsor, incrementar y reducir el número de estos.

Referencias

- [1] E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, and S. M. Kresta, *Handbook of Industrial Mixing - SCIENCE AND PRACTICE*. 2004.
- [2] V. A. A.-O. Suzanne M. Kresta, Arthur W. Etchells, David S. Dickey, *ADVANCES IN INDUSTRIAL MIXING - A COMPANION TO THE HANDBOOK OF INDUSTRIAL MIXING*. John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [3] M. R. B. M F Edwards, *Mixing in the Process Industries*. Butterworth-Heinemann, 1992.
- [4] Philadelphia Mixing Solutions, "Philadelphia Mixing Solutions | Optimizing Mixing Process." <https://www.philamixers.com/> (accessed Jul. 22, 2021).
- [5] FAWCETT CO - MIXING EQUIPMENT, "Fawcett Industrial Mixers, Mixer Blades, Tank Agitators & Accessories." <https://www.fawcettco.com/> (accessed Jul. 22, 2021).
- [6] Pfaudler UK Ltd, "Technologies, Systems and Services provider for the chemical and pharmaceutical industries," 2019. <https://www.pfaudler.com/> (accessed Jul. 19, 2021).
- [7] INDCO, "Industrial Mixers - Dispersers, Impellers, Stirrers | INDCO." <https://www.indco.com/> (accessed Jul. 22, 2021).
- [8] Dynamix Agitators Inc., "Industrial Agitators Manufacturer - Industrial Batch Mixers & Agitators." <https://dynamixinc.com/> (accessed Jul. 17, 2021).
- [9] EKATO HOLDING GmbH, "Market leader in agitation and mixing technology | EKATO." <https://www.ekato.com/> (accessed Jul. 12, 2021).
- [10] P. M. Doran, *Bioprocess Engineering Principles*. Elsevier, 2013.
- [11] P. W. R. Fasano J.B., Bakker A., "Advanced Impeller Geometry Boosts Liquid Agitation," *Chem. Eng.*, p. 7, 1994.
- [12] J. Fitschen, M. Maly, A. Rosseburg, J. Wutz, T. Wucherpfennig, and M. Schlüter, "Influence of Spacing of Multiple Impellers on Power Input in an Industrial-Scale Aerated Stirred Tank Reactor," *Chemie Ing. Tech.*, vol. 91, no. 12, pp. 1794–1801, Dec. 2019.
- [13] V. Hudcova, V. Machon, and A. W. Nienow, "Gas–liquid dispersion with dual Rushton impellers," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 34, no. 5, pp. 617–628, 1989.
- [14] M. Yoshida, Y. Wakura, K. Yamagiwa, A. Ohkawa, and S. Tezura, "Effect of impeller clearance on liquid flow within an unbaffled vessel agitated with a forward-reverse rotating impeller," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 87, no. 6, pp. 832–838, 2009.
- [15] B. James, "Mixing 101: Baffled by Baffles? | Dynamix Agitators," 2012. <https://dynamixinc.com/baffled-by-baffles/> (accessed Jul. 07, 2021).
- [16] HAYWARD GORDON LTD., "Mixing Fundamentals," 1998.
- [17] K. J. Myers, M. F. Reeder, A. Bakker, and M. Rigden, "Agitating for Success," *Chem. Eng.*, no. October, pp. 39–42, 1996.

- [18] J. M. F. ORO, *TECNICAS NUMERICAS EN INGENIERIA DE FLUIDOS*. REVERTE, 2012.
- [19] M. Breuer and C. Bartels, "Application of LES and DNS to complex turbulent flows," *Eur. Congr. Comput. Methods Appl. Sci. Eng. ECCOMAS 2000*, no. September, pp. 11–14, 2000.
- [20] A. Bilel, D. Zied, K. Sarhan, and A. Mohamed, "PIV study of the down-pitched blade turbine hydrodynamic structure," *Lect. Notes Mech. Eng.*, pp. 237–244, 2013.
- [21] Y. Hu, Z. Liu, J. Yang, Y. Jin, and Y. Cheng, "Study on the reactive mixing process in an unbaffled stirred tank using planar laser-induced fluorescence (PLIF) technique," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 65, no. 15, pp. 4511–4518, 2010.
- [22] A. Gabriele, A. W. Nienow, and M. J. H. Simmons, "Use of angle resolved PIV to estimate local specific energy dissipation rates for up- and down-pumping pitched blade agitators in a stirred tank," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 64, no. 1, pp. 126–143, 2009.
- [23] V. V. Ranade and J. B. Joshi, "Flow generated by pitched blade turbines I: measurements using laser doppler anemometer," *Chem. Eng. Commun.*, vol. 81, no. 1, pp. 197–224, 1989.
- [24] S. M. Kresta and P. E. Wood, "The flow field produced by a pitched blade turbine: Characterization of the turbulence and estimation of the dissipation rate," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 48, no. 10, pp. 1761–1774, 1993.
- [25] S. M. Kresta and P. E. Wood, "The mean flow field produced by a 45° pitched blade turbine: Changes in the circulation pattern due to off bottom clearance," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 71, pp. 42–53, 1993.
- [26] D. Mao, L. Feng, K. A. I. Wang, and Y. Li, "The mean flow field generated by a pitched blade turbine : Changes in the circulation pattern due to impeller geometry," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 75, pp. 307–316, 1997.
- [27] M. Pettersson and C. Rasmuson, "Hydrodynamics of suspensions agitated by pitched blade turbine," *AIChE J.*, vol. 44, no. 3, pp. 513–527, 1998.
- [28] J. Sheng, H. Meng, and R. O. Fox, "A large eddy PIV method for turbulence dissipation rate estimation," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 55, no. 20, pp. 4423–4434, 2000.
- [29] J. Aubin, P. Mavros, D. F. Fletcher, J. Bertrand, and C. Xuereb, "Effect of axial agitator configuration (up-pumping, down-pumping, reverse rotation) on flow patterns generated in stirred vessels," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 79, no. 8, pp. 845–856, 2001.
- [30] J. Wu, Y. Zhu, and L. Pullum, "Impeller geometry effect on velocity and solids suspension," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 79, no. 8, pp. 989–997, 2001.
- [31] I. Fořt, T. Jirout, R. Sperling, S. Jambere, and F. Rieger, "Study of Pumping Capacity of Pitched Blade Impellers," *Acta Polytech.*, vol. 42, no. 4, pp. 68–72, 2002.
- [32] D. Chapple, S. M. M. Kresta, A. Wall, and A. Afacan, "The Effect of Impeller and Tank Geometry on Power Number for a Pitched Blade Turbine," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 80, no. 4, pp. 364–372, 2002.

- [33] F. R. Khan, C. D. Rielly, and G. K. Hargrave, "A multi-block approach to obtain angle-resolved PIV measurements of the mean flow and turbulence fields in a stirred vessel," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 264–269, 2004.
- [34] F. R. Khan, C. D. Rielly, and D. A. R. R. Brown, "Angle-resolved stereo-PIV measurements close to a down-pumping pitched-blade turbine," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 61, no. 9, pp. 2799–2806, 2006.
- [35] M. Taghavi and J. Moghaddas, "Using PLIF/PIV techniques to investigate the reactive mixing in stirred tank reactors with Rushton and pitched blade turbines," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 151, pp. 190–206, 2019.
- [36] J. Stelmach, R. Musoski, C. Kunczewicz, and M. Głogowski, "Turbulent energy dissipation rate and turbulence scales in the blade region of a self-aspirating disk impeller," *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 12, no. 3, pp. 715–728, 2019.
- [37] A. Paglianti and G. Montante, "Simultaneous measurements of liquid velocity and tracer concentration in a continuous flow stirred tank," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 216, p. 115495, 2020.
- [38] S. T. L. Harrison, A. Kotsiopoulos, R. Stevenson, and J. J. Cilliers, "Mixing indices allow scale-up of stirred tank slurry reactor conditions for equivalent homogeneity," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 153, pp. 865–874, 2020.
- [39] R. Afshar Ghotli, M. S. Shafeeyan, M. R. Abbasi, A. A. Abdul Raman, and S. Ibrahim, "Macromixing study for various designs of impellers in a stirred vessel," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 148, no. December 2019, p. 107794, 2020.
- [40] D. Fernandes del Pozo, A. Liné, K. M. Van Geem, C. Le Men, and I. Nopens, "Hydrodynamic analysis of an axial impeller in a non-Newtonian fluid through particle image velocimetry," *AIChE J.*, vol. 66, no. 6, 2020.
- [41] V. Cappello, C. Plais, C. Vial, and F. Augier, "Bubble size and liquid-side mass transfer coefficient measurements in aerated stirred tank reactors with non-Newtonian liquids," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 211, p. 115280, 2020.
- [42] S. Başbuğ, G. Papadakis, and J. C. Vassilicos, "Reduced power consumption in stirred vessels by means of fractal impellers," *AIChE J.*, vol. 64, no. 4, pp. 1485–1499, 2018.
- [43] F. Yang, S. Zhou, and G. Wang, "Detached eddy simulation of the liquid mixing in stirred tanks," *Comput. Fluids*, vol. 64, pp. 74–82, 2012.
- [44] M. D. Fokema, S. M. Kresta, and P. E. Wood, "Importance of using the correct impeller boundary conditions for CFD simulations of stirred tanks," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 72, no. 2, pp. 177–183, 1994.
- [45] A. K. Sahu and J. B. Joshi, "Simulation of Flow in Stirred Vessels with Axial Flow Impellers: Effects of Various Numerical Schemes and Turbulence Model Parameters," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 34, no. 2, pp. 626–639, 1995.
- [46] C. K. K. Harris *et al.*, "Computational fluid dynamics for chemical reactor engineering," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 51, no. 10, pp. 1569–1594, 1996.
- [47] A. Bakker, R. D. Laroche, M. H. Wang, and R. V. Calabrese, "Sliding mesh simulation of laminar flow in stirred reactors," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 75, no. 1, pp. 42–44, 1997.

- [48] A. . K. Sahu *et al.*, "Simulation of Flow in Stirred Vessel with Axial Flow Impeller: Zonal Modeling and Optimization of Parameters," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, no. 6, pp. 2116–2130, 1998.
- [49] J. Derksen, "Assessment of large eddy simulations for agitated flows," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 79, no. 8, pp. 824–830, 2001.
- [50] N. K. Nere, A. W. Patwardhan, and J. B. Joshi, "Prediction of flow pattern in stirred tanks : new constitutive equation for eddy viscosity previous work on CFD simulation of axial," *Ind. Chem. Eng. Res.*, vol. 40, pp. 1755–1772, 2001.
- [51] V. V. Ranade, Y. Tayalia, and H. Krishnan, "CFD predictions of flow near impeller blades in baffled stirred vessels: Assessment of computational snapshot approach," *Chem. Eng. Commun.*, vol. 189, no. 7, pp. 895–922, 2002.
- [52] J. Aubin, D. F. D. F. Fletcher, and C. Xuereb, "Modeling turbulent flow in stirred tanks with CFD: The influence of the modeling approach, turbulence model and numerical scheme," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 28, no. 5, pp. 431–445, 2004.
- [53] G. Montante and F. Magelli, "Modelling of solids distribution in stirred tanks: Analysis of simulation strategies and comparison with experimental data," *Int. J. Comput. Fluid Dyn.*, vol. 19, no. 3, pp. 253–262, 2005.
- [54] M. Tyagi, S. Roy, A. D. Harvey, and S. Acharya, "Simulation of laminar and turbulent impeller stirred tanks using immersed boundary method and large eddy simulation technique in multi-block curvilinear geometries," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 62, no. 5, pp. 1351–1363, 2007.
- [55] R. Achouri, I. Mokni, H. Mhiri, and P. Bournot, "A 3D CFD simulation of a self inducing Pitched Blade Turbine Downflow," *Energy Convers. Manag.*, vol. 64, pp. 633–641, 2012.
- [56] M. Karimi, G. Akdogan, and S. M. Bradshaw, "Effects of different Mesh schemes and turbulence models in CFD modelling of stirred tanks," *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 48, no. 2, pp. 513–531, 2012.
- [57] H. C. Oliver, R. A. Yonatan, V. X. Mendoza-Escamilla, M. Helvio, M. A. Morales-Mora, and S. A. Martínez-Delgadillo, "The effect of internal impellers on mixing in an electrochemical reactor with rotating rings electrodes," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 88, pp. 37–46, 2015.
- [58] P. Vlček, B. Kysela, T. Jirout, and I. Fořt, "Large eddy simulation of a pitched blade impeller mixed vessel - Comparison with LDA measurements," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 108, no. 1998, pp. 42–48, 2016.
- [59] G. L. Lane, "Improving the accuracy of CFD predictions of turbulence in a tank stirred by a hydrofoil impeller," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 169, pp. 188–211, 2017.
- [60] A. Zamiri and J. T. Chung, "Ability of URANS approach in prediction of unsteady turbulent flows in an unbaffled stirred tank," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 133, no. June, pp. 178–187, 2017.
- [61] A. Tamburini, G. Gagliano, G. Micale, A. Brucato, F. Scargiali, and M. Ciofalo, "Direct numerical simulations of creeping to early turbulent flow in unbaffled and baffled stirred tanks," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 192, no. December, pp. 161–175, 2018.
- [62] C. Haringa, R. Vandewijer, and R. F. Mudde, "Inter-compartment interaction in

- multi-impeller mixing. Part II. Experiments, sliding mesh and large Eddy simulations," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 136, pp. 886–899, 2018.
- [63] L. Li, K. Xiang, and B. Xiang, "Numerical simulation of transient power consumption characteristics in an unbaffled stirred tank," *Chem. Pap.*, vol. 74, no. 9, pp. 2849–2859, 2020.
- [64] C. Y. Ge, J. J. Wang, X. P. Gu, and L. F. Feng, "CFD simulation and PIV measurement of the flow field generated by modified pitched blade turbine impellers," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 92, no. 6, pp. 1027–1036, 2014.
- [65] V. V. Ranade, V. P. Mishra, V. S. Saraph, G. B. Deshpande, and J. B. Joshi, "Comparison of axial-flow impellers using a laser doppler anemometer," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 31, no. 10, pp. 2370–2379, 1992.
- [66] A. Bakker, K. J. Myers, R. W. Ward, and C. K. Lee, "The laminar and turbulent flow pattern of a pitched blade turbine," *ICHEME*, vol. 74, pp. 485–491, 1996.
- [67] P. M. Armenante, C. Luo, C. Chou, I. Fořt, and J. Medek, "Velocity profiles in a closed, unbaffled vessel: comparison between experimental LDV data and numerical CFD predictions," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 52, no. 20, pp. 3483–3492, 1997.
- [68] A. W. Patwardhan and J. B. Joshi, "Relation between flow pattern and blending in stirred tanks," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 38, no. 8, pp. 3131–3143, 1999.
- [69] G. Montante, G. Micale, F. Magelli, and A. Brucato, "Experiments and CFD predictions of solid particle distribution in a vessel agitated with four pitched blade turbines," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 79, no. 8, pp. 1005–1010, 2001.
- [70] Z. Jaworski, K. N. N. Dyster, and a. W. W. Nienow, "The effect of size, location and pumping direction of pitched blade turbine impellers on flow patterns: LDA measurements and CFD predictions," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 79, no. 8, pp. 887–894, 2001.
- [71] Z. Jaworski and B. Zakrzewska, "Modelling of the turbulent wall jet generated by a pitched blade turbine impeller: The effect of turbulence model," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 80, no. 8, pp. 846–854, 2002.
- [72] V. Roussinova, S. M. Kresta, and R. Weetman, "Low frequency macroinstabilities in a stirred tank: Scale-up and prediction based on large eddy simulations," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 58, no. 11, pp. 2297–2311, 2003.
- [73] M. Li, G. White, D. Wilkinson, and K. J. Roberts, "Scale up study of retreat curve impeller stirred tanks using LDA measurements and CFD simulation," *Chem. Eng. J.*, vol. 108, no. 1–2, pp. 81–90, 2005.
- [74] T. Kumaresan, N. K. Nere, and J. B. Joshi, "Effect of internals on the flow pattern and mixing in stirred tanks," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 115, no. 26, pp. 9951–9961, 2005.
- [75] B. N. Murthy, N. A. Deshmukh, A. W. Patwardhan, and J. B. Joshi, "Hollow self-inducing impellers: Flow visualization and CFD simulation," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 62, no. 14, pp. 3839–3848, 2007.
- [76] B. N. Murthy and J. B. Joshi, "Assessment of standard $k - \epsilon$, RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel agitated by various impeller designs," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 63, no. 22, pp. 5468–5495, 2008.

- [77] T. Nurtono, H. Setyawan, A. Altway, and S. Winardi, "Macro-instability characteristic in agitated tank based on flow visualization experiment and large eddy simulation," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 87, no. 7, pp. 923–942, 2009.
- [78] J. Ding, X. Wang, X. F. Zhou, N. Q. Ren, and W. Q. Guo, "CFD optimization of continuous stirred-tank (CSTR) reactor for biohydrogen production," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 18, pp. 7005–7013, 2010.
- [79] S. Roy, S. Acharya, and M. D. Cloeter, "Flow structure and the effect of macro-instabilities in a pitched-blade stirred tank," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 65, no. 10, pp. 3009–3024, 2010.
- [80] C. Meng, J. Huang, C. Ye, W. Cheng, J. Chen, and Y. Li, "Comparing the performances of circular ponds with different impellers by CFD simulation and microalgae culture experiments," *Bioprocess Biosyst. Eng.*, vol. 38, no. 7, pp. 1347–1363, 2015.
- [81] H. Bashiri, E. Alizadeh, F. Bertrand, and J. Chaouki, "Investigation of turbulent fluid flows in stirred tanks using a non-intrusive particle tracking technique," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 140, pp. 233–251, 2016.
- [82] Y. Zhang, Z. Gao, and Z. Li, "Transitional Flow in a Rushton Turbine Stirred Tank," *AIChE J.*, no. 504, pp. 3–194, 2017.
- [83] G. Martínez-de Jesús, J. Ramírez-Muñoz, D. García-Cortés, and L. G. Cota, "Computational Fluid Dynamics Study of Flow Induced by a Grooved High-Shear Impeller in an Unbaffled Tank," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 580–589, 2018.
- [84] C. Haringa, R. Vandewijer, and R. F. Mudde, "Inter-compartment interaction in multi-impeller mixing: Part I. Experiments and multiple reference frame CFD," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 136, pp. 870–885, 2018.
- [85] S. Balemans *et al.*, "The impact of local hydrodynamics on high-rate activated sludge flocculation in laboratory and full-scale reactors," *Processes*, vol. 8, no. 2, pp. 1–18, 2020.
- [86] B. Aslanbay Guler, I. Deniz, Z. Demirel, S. S. Oncel, and E. Imamoglu, "Computational fluid dynamics modelling of stirred tank photobioreactor for *Haematococcus pluvialis* production: Hydrodynamics and mixing conditions," *Algal Res.*, vol. 47, no. February, p. 101854, 2020.
- [87] D. A. Deglon and C. J. Meyer, "CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations," *Miner. Eng.*, vol. 19, no. 10, pp. 1059–1068, 2006.
- [88] TSI Incorporated, "SEED PARTICLES FOR LDV AND PIV - P/N 2980461 Rev C." p. 2, 2012.
- [89] TSI Incorporated, "Insight 4G Global Image, Acquisition, Analysis, & Display Software - TUTORIAL GUIDE - P/N 6005115 Rev B," no. June. p. 85, 2014.
- [90] S. A. Martínez-Delgadillo, A. Alonzo-Garcia, V. X. Mendoza-Escamilla, I. González-Neria, and J. Antonio Yáñez-Varela, "Analysis of the turbulent flow and trailing vortices induced by new design grooved blade impellers in a baffled tank," *Chem. Eng. J.*, vol. 358, 2019.
- [91] TSI Incorporated, "PIV System Installation Manual - P/N 1990733 Rev F." p. 20, 2011.

- [92] C. Shekhar, K. Takahashi, T. Matsunaga, and K. Nishino, "TOMOGRAPHIC PIV MEASUREMENT OF TURBULENCE CHARACTERISTICS AND MAXIMUM SHEAR STRESS IN A SQUARE- SHAPED STIRRED FLOW MIXER," pp. 1–17, 2014.
- [93] A. Khopkar *et al.*, "Flow Generated by Radial Flow Impellers: PIV Measurements and CFD Simulations," *Int. J. Chem. React. Eng.*, vol. 2, no. 1, 2004.
- [94] P. Saarenrinne and M. Piirto, "Turbulent kinetic energy dissipation rate estimation from PIV velocity vector fields," *Exp. Fluids*, vol. 29, no. SUPPL. 1, pp. 300–307, 2000.
- [95] Z. Li, Y. Bao, and Z. Gao, "PIV experiments and large eddy simulations of single-loop flow fields in Rushton turbine stirred tanks," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 66, pp. 1219–1231, 2011.
- [96] C. Wang, Y. Xu, Y. Wu, and Z. An, "PIV investigation of the flow features of double and single 45° up-pumping pitched blade turbines in a square tank," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 96, no. 3, pp. 788–799, 2018.
- [97] N. Liu *et al.*, "A PIV investigation of the effect of disperse phase fraction on the turbulence characteristics of liquid–liquid mixing in a stirred tank," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 152, pp. 528–546, 2016.
- [98] B. Ben Amira, Z. Driss, and M. Saleh Abid, "Experimental study of the up-pitching blade effect with a PIV application," *Ocean Eng.*, vol. 102, pp. 95–104, 2015.
- [99] A. Delafosse, M. L. Collignon, M. Crine, and D. Toye, "Estimation of the turbulent kinetic energy dissipation rate from 2D-PIV measurements in a vessel stirred by an axial Mixel TTP impeller," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 66, no. 8, pp. 1728–1737, 2011.
- [100] D. Xu and J. Chen, "Accurate estimate of turbulent dissipation rate using PIV data," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 44, pp. 662–672, 2013.
- [101] B. Kysela, D. Jašíková, J. Konfršt, R. Šulc, and P. Dítl, "Estimation of turbulence dissipation rate by Large eddy PIV method in an agitated vessel," *EPJ Web Conf.*, vol. 92, pp. 4–8, 2015.
- [102] C. Shekhar, K. Takahashi, T. Matsunaga, and K. Nishino, "Application of Subgrid Stress Model to Volumetric PIV Results for Estimation of Turbulence Dissipation Rate in a Stirred Mixer," 2015.
- [103] G. Bertens, D. van der Voort, H. Bocanegra-Evans, and W. van de Water, "Large-eddy estimate of the turbulent dissipation rate using PIV," *Exp. Fluids*, vol. 56, no. 5, pp. 1–9, 2015.
- [104] R. Šulc, V. Pešava, and P. Dítl, "Estimating the local turbulent energy dissipation rate using 2-D PIV measurements and a 1-D energy spectrum function," *Theor. Found. Chem. Eng.*, vol. 49, no. 2, pp. 145–156, 2015.
- [105] K. V. Sharp and R. J. Adrian, "PIV Study of small-scale flow structure around a Rushton turbine," *AIChE J.*, vol. 47, no. 4, pp. 766–778, 2001.
- [106] T. Tanaka and J. K. Eaton, "A correction method for measuring turbulence kinetic energy dissipation rate by PIV," *Exp. Fluids*, vol. 42, no. 6, pp. 893–902, 2007.

- [107] F. R. Khan, *Investigation of turbulent flows and instabilities in a stirred vessel using particle image velocimetry*. 2005.
- [108] J. Meyers and P. Sagaut, *On the model coefficients for the standard and the variational multi-scale Smagorinsky model*, vol. 569. 2006.
- [109] I. Fořt, P. Seichter, L. Peřl, F. Rieger, and T. Jirout, "Blending characteristics of high-speed rotary impellers," *Chem. Process Eng. - Inz. Chem. i Proces.*, vol. 34, no. 4, pp. 427–434, Dec. 2013.
- [110] I. Fořt and T. Jirout, "A study on blending characteristics of axial flow impellers," *Chem. Process Eng. - Inz. Chem. i Proces.*, vol. 32, no. 4, pp. 311–319, Dec. 2011.
- [111] G. Grenville, Richard and Giacomelli, Jason and Brown, David and Padron, "Mixing: Impeller performance in stirred tanks," *Chem. Eng.*, vol. 124, pp. 42–51, 2017.
- [112] W. Malalasekera and H. K. Versteeg, *An introduction to computational fluid dynamics*, Second edi. Pearson Education, 2007.
- [113] M. Coroneo, G. Montante, A. Paglianti, and F. Magelli, "CFD prediction of fluid flow and mixing in stirred tanks: Numerical issues about the RANS simulations," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 35, no. 10, pp. 1959–1968, 2011.
- [114] A. Delafosse, A. Line, J. Morchain, and P. Guiraud, "LES and URANS simulations of hydrodynamics in mixing tank: Comparison to PIV experiments," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 86, no. 12, pp. 1322–1330, 2008.
- [115] V. X. Mendoza-Escamilla, A. Alonzo-García, H. R. Mollinedo, I. González-Neria, J. Antonio Yáñez-Varela, and S. A. Martínez-Delgadillo, "Assessment of $k-\epsilon$ models using tetrahedral grids to describe the turbulent flow field of a PBT impeller and validation through the PIV technique," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 26, no. 5, pp. 942–956, 2018.
- [116] H. Hartmann, J. J. Derksen, C. Montavon, J. Pearson, I. S. Hamill, and H. E. A. A. van den Akker, "Assessment of large eddy and RANS stirred tank simulations by means of LDA," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 59, no. 12, pp. 2419–2432, 2004.
- [117] R. Zadghaffari, J. S. Moghaddas, and J. Revstedt, "Large-eddy simulation of turbulent flow in a stirred tank driven by a Rushton turbine," *Comput. Fluids*, vol. 39, no. 7, pp. 1183–1190, 2010.
- [118] P. Sagaut and C. Cambon, *Homogeneous turbulence dynamics*. Springer International Publishing, 2018.
- [119] H. Tennekes and J. L. Lumley, *A First Course in Turbulence*. The MIT Press, 1972.
- [120] P. (Peter) Bradshaw, *An introduction to turbulence and its measurement*. Pergamon Press, 1971.
- [121] ANSYS-Inc., "ANSYS Fluent Theory Guide R15.0," vol. 15317, no. November. pp. 724–746, 2013.
- [122] D. R. Launchbury, "Unsteady Turbulent Flow Modelling and Applications," 2016.
- [123] ANSYS-Inc., "ANSYS Fluent User' s Guide R 15.0," vol. 15317, no. November.

- pp. 724–746, 2013.
- [124] A. Gerasimov, “Quick Guide to Setting Up LES-type Simulations V1.4,” *Ansys Customer Portal*. pp. 1–50, 2016.
- [125] A. Alonzo-Garcia, V. X. Mendoza-Escamilla, S. A. Martinez-Delgadillo, I. Gonzalez-Neria, C. Del C Gutiérrez-Torres, and J. A. Jiménez-Bernal, “On the performance of different rans based models to describe the turbulent flow in an agitated vessel using non-structured grids and PIV validation,” *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 36, no. 1, 2019.
- [126] J. F. Wendt *et al.*, *Computational fluid dynamics: An introduction*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [127] S. Biringen and C. Y. Chow, *An introduction to computational fluid mechanics by example*. John Wiley and Sons, 2011.
- [128] R. Alcamo, G. Micale, F. Grisafi, A. Brucato, and M. Ciofalo, “Large-eddy simulation of turbulent flow in an unbaffled stirred tank driven by a Rushton turbine,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 60, no. 8-9 SPEC. ISS., pp. 2303–2316, 2005.
- [129] I. Solís-Gallego, K. M. A. Díaz, J. M. F. Oro, and S. Velarde-Suárez, “Wall-resolved LES modeling of aWind turbine airfoil at different angles of attack,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 3, 2020.
- [130] S. L. Yeoh, G. Papadakis, and M. Yianneskis, “Numerical Simulation of Turbulent Flow Characteristics in a Stirred Vessel Using the LES and RANS Approaches with the Sliding/Deforming Mesh Methodology,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 82, no. 7, pp. 834–848, 2004.
- [131] T. T. Devi and B. Kumar, “Large-eddy simulation of turbulent flow in stirred tank with a curved blade impeller,” *J. Eng. Thermophys.*, vol. 24, no. 2, pp. 152–168, 2015.
- [132] M. Soos, R. Kaufmann, R. Winteler, M. Kroupa, and B. Luthi, “Determination of Maximum Turbulent Energy Dissipation Rate generated by a Rushton Impeller through Large Eddy Simulation,” *Am. Inst. Chem. Eng. J.*, vol. 59, no. 10, pp. 3642–3658, 2013.
- [133] Z. Li, M. Hu, Y. Bao, and Z. Gao, “Particle image velocimetry experiments and large eddy simulations of merging flow characteristics in dual Rushton turbine stirred tanks,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 51, no. 5, pp. 2438–2450, 2012.
- [134] P. J. Boache and P. J. Roache, “Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies,” *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 116, no. 3, pp. 405–413, 1994.
- [135] P. J. Roache, “Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 29, no. 1, pp. 123–160, 1997.
- [136] K. J. Craig, M. N. Nieuwoudt, and L. J. Niemand, “CFD simulation of anaerobic digester with variable sewage sludge rheology,” *Water Res.*, vol. 47, no. 13, pp. 4485–4497, 2013.
- [137] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman, and P. E. Raad, “Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications,” *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 130, no. 7, pp. 0780011–0780014, 2008.

- [138] J. Franke and W. Frank, "Application of generalized Richardson extrapolation to the computation of the flow across an asymmetric street intersection," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 96, no. 10–11, pp. 1616–1628, 2008.
- [139] K. M. Almohammadi, D. B. Ingham, L. Ma, and M. Pourkashan, "Computational fluid dynamics (CFD) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine," *Energy*, vol. 58, pp. 483–493, 2013.
- [140] C. J. Roy, "Review of Discretization Error Estimators in Scientific Computing," 2010.
- [141] Z. Jaworski, A. W. Nienow, and K. N. Dyster, "An LDA study of the turbulent flow field in a baffled vessel agitated by an axial, down-pumping hydrofoil impeller," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 74, no. 1, pp. 3–15, Feb. 1996.
- [142] J. JEong and F. Hussain, "On the identification of a vortex," *J. Fluid Mech.*, vol. 285, pp. 69–94, 1995.
- [143] H. E. Fiedler, "Coherent structures in turbulent flows," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 25, no. 3, pp. 231–269, 1988.
- [144] Z. Chara, B. Kysela, J. Konfrst, and I. Fort, "Study of fluid flow in baffled vessels stirred by a Rushton standard impeller," *Appl. Math. Comput.*, vol. 272, pp. 614–628, 2016.
- [145] R. Escudié and A. Liné, "A simplified procedure to identify trailing vortices generated by a Rushton turbine," *AIChE J.*, vol. 53, no. 2, pp. 523–526, Feb. 2007.
- [146] I. González-Neria *et al.*, "PIV and dynamic LES of the turbulent stream and mixing induced by a V-grooved blade axial agitator," *Chem. Eng. J.*, vol. 374, 2019.
- [147] B. Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Van Wachem, *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge, 2011.
- [148] A. Nie, Z. Gao, L. Xue, Z. Cai, G. M. Evans, and A. Eaglesham, "Micromixing performance and the modeling of a confined impinging jet reactor/high speed disperser," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 184, pp. 14–24, 2018.
- [149] J. R. Garcia, H. J. Cha, G. Rao, M. R. Marten, and W. E. Bentley, "Microbial nar-GFP cell sensors reveal oxygen limitations in highly agitated and aerated laboratory-scale fermentors," *Microb. Cell Fact.*, vol. 8, pp. 1–7, 2009.
- [150] L. E. E. L. T. Fan, B. I. Tsai, "Simultaneous Effect of Macromixing and icromixing on Growth Processes," *Am. Inst. Chem. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 689–696, 1971.
- [151] H. Beiki and M. Keramati, "Improvement of Methane Production from Sugar Beet Wastes Using TiO₂ and Fe₃O₄ Nanoparticles and Chitosan Micropowder Additives," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 189, no. 1, pp. 13–25, 2019.

Apéndice

Apéndice A - Comparación de la velocidad axial - impulsor PBT

Velocidad axial - PIV

Velocidad axial - LES1

Apéndice B - Comparación de la velocidad axial - impulsor U

Velocidad axial - LES1

Apéndice C - Comparación de la velocidad axial - impulsor V

Velocidad axial - PIV

Apéndice G - Comparación de la energía cinética turbulenta

κ - impulsor PBT - PIV

κ - impulsor PBT - LES1

κ - impulsor PBT - LES2

κ - impulsor U - PIV

k - impulsor U - LES2

κ - impulsor v - PIV

κ - impulsor v - LES1

k - impulsor v - LES2

Apéndice H - Comparación de la tasa de disipación - impulsor PBT

Apéndice I - Comparación de la tasa de disipación - impulsor U

Tasa de disipación - LES2

Apéndice J - Comparación de la tasa de disipación - impulsor V

Tasa de disipación - LES1

Apéndice K - Comparación de la tasa de disipación

ϵ - impulsor PBT - LES2

ϵ - impulsor V - LES1

ϵ - impulsor V - LES2