



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE QUIMICA

**PERTURBACIONES GEOMÉTRICAS EN TANQUES
AGITADOS MECÁNICAMENTE**

T E S I S

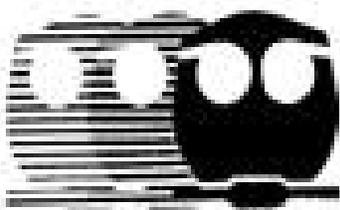
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA**

P R E S E N T A :

ANTONIO HIDALGO MILLÁN

DIRECTOR

GABRIEL ASCANIO GASCA



2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Herrera Nájera Rafael**

Secretario: **Dr. Zenit Camacho José Roberto**

Vocal: **Dra. Xuereb Catherine**

1er suplente: **Dr. Soto Castruita Enrique**

2do. Suplente: **Dr. Ascanio Gasca Gabriel**

Entidad académica en la que se realizo la tesis:

**CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNÓLOGICO,
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, CIUDAD UNIVERSITARIA,
MÉXICO D. F., MÉXICO.**

TUTOR DE TESIS

DR. GABRIEL ASCANIO GASCA

DEDICATORIA

El haber realizado este proyecto siempre es un motivo de orgullo y satisfacción. En este camino arduo y laborioso, existen personas muy especiales a las cuales les agradezco su compañía. Les dedico este logro en mi vida y espero poder agradecerse los siempre.

A **DIOS** le agradezco por la vida, la salud y por bendecirme en el camino para la culminación de una meta más en mi vida. Le agradezco por haberme otorgado paciencia, inteligencia, capacidad de esforzarme y luchar en la vida en busca de la culminación de mis objetivos. Así como por la enorme bendición de tener una maravillosa familia que me apoya, quiere, alienta y motiva en cada decisión para seguir adelante y no claudicar jamás sin importar la adversidad que se presente.

A **MAMÁ** por todo su amor, consejos, alegrías, regaños y eso sí; siempre con el gran amor que me ha demostrado incondicionalmente. Sobre todo por ser la persona más maravillosa que Dios puso en mi camino, creyendo ciegamente en mí. Por darme su bendición cada día para lograr mis metas, apoyándome incondicionalmente en cada instante de mi vida. Gracias por ser el ángel de mi existencia. La quiero mucho.

A mis hermanos **Miguel, Agustín y Lilia** por su apoyo para conseguir mis objetivos. Por estar incondicionalmente a cada instante y por los grandes momentos compartidos.

A mis **sobrinos** por sus sonrisas, sus alegrías y por llenar mi vida de felicidad a cada instante. Por esa magia que ejercen alrededor de todo lo que los rodea y demostrar su amor incondicionalmente.

A mi **PAPÁ** por sus enseñanzas, consejos y motivación para buscar ser siempre mejor en la vida.

A mis amigos y compañeros **Jonathan, Ricardo, Igmarr, Julio, Miguel, Servando, Benjamín, Álvaro y Javier**, por la amistad y apoyo brindados durante esta etapa de formación académica.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, al Posgrado en Ingeniería, a la Facultad de Química y al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico por las facilidades de realizar los estudios de doctorado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado durante el tiempo de mi formación académica de Doctorado, mediante la beca con número de registro 202753.

Al Laboratoire de Genie Chimique CNRS/INP en Toulouse, por las facilidades otorgadas durante mi estancia en Francia.

Al Dr. Gabriel Ascanio por su asesoramiento, enseñanzas, consejos y sobre todo por la paciencia (que debió ser mucha) y dedicación otorgadas durante todo el período de mi formación doctoral. Además por la oportunidad de poder participar en diversos congresos nacionales e internacionales de investigación científica.

Al Dr. Enrique Galindo por hacerme la vida imposible durante los tutoriales, ya que gracias a ello mi esfuerzo fue mayor.

Al Dr. Rafael Herrera por su apoyo y sabios consejos durante todo el tiempo que otorgo en la supervisión de mi proyecto.

Al Dr. Roberto Zenit por su ayuda, paciencia y facilidades otorgadas para la realización de los experimentos, supervisión de los resultados y revisión de mi trabajo en el laboratorio a su cargo en el IIM.

A la Dra. Catherine Xuereb, por su tiempo, asesoramiento y supervisión durante mi estancia realizada en Toulouse Francia. También por las facilidades en el uso de las instalaciones en el Laboratoire de Genie Chimique.

Índice

Índice.....	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xii
Símbolos	xiii
Resumen.....	1
Abstract	4
1 Introducción.....	6
1.1 Generalidades	6
1.1.1 Grupos adimensionales y regímenes de agitación	9
1.1.2 Mecanismos de mezclado	11
1.1.3 Geometrías de agitadores	13
1.1.4 Tanques de mezclado	15
1.1.5 Tiempos de mezclado.....	16
1.2 Técnicas de visualización de patrones de flujo en tanques agitados	18
1.2.1 Velocimetría mediante ultrasónica-Doppler	18
1.2.2 Seguidores de flujo	19
1.2.3 Colorimetría	19
1.2.4 Termografía	20
1.2.5 Tomografía	20
1.2.6 Velocimetría mediante láser-Doppler.....	21
1.2.7 Imagen de velocimetría de partículas (PIV).....	22
1.2.8 Fluorescencia inducida por láser (LIF).....	23
1.3 Patologías de mezclado en régimen laminar	23

1.4	Estrategias para disminuir zonas segregadas.....	26
2	Objetivos:	29
2.1	General	29
2.2	Específicos:.....	29
3	Metodología y Desarrollo experimental.....	30
3.1	Sistema de mezclado	30
3.2	Métodos de visualización	32
3.2.1	Colorimetría	32
3.2.2	Método de PIV (Velocimetría de imágenes de partículas).....	36
3.3	Condiciones de operación.....	37
4	Resultados	39
4.1	Formación de cavernas.....	39
4.2	Tiempo de mezclado	44
4.3	Consumo de potencia y energía	53
4.4	Campos de flujo	57
4.4.1	Mapas de velocidad y líneas de corriente.....	57
4.4.2	Mapas de vorticidad.....	63
4.4.3	Capacidad de bombeo y Gasto volumétrico	68
4.4.4	Velocidad vertical.....	74
5	Conclusiones.....	79
6	Apéndices	81
6.1	Apéndice 1	81
6.2	Apéndice 2	84
7	Bibliografía	85

Índice de figuras

Figura 1.1. Gráfica típica de regímenes de mezclado	10
Figura 1.2 Mecanismo de mezclado en régimen laminar	12
Figura 1.3. Agitadores para flujo laminar (Tatterson <i>et al</i> , 1991).....	13
Figura 1.4. Agitadores para tanque de mezclado: (a) flujo radial; (b) flujo axial (Tatterson <i>et al</i> , 1991).....	15
Figura 1.5. Características típicas de un tanque de mezclado	16
Figura 1.6. Determinación de tiempo de mezclado, utilizando concentración de un trazador	17
Figura 1.7. Imagen obtenida con el método de colorimetría	20
Figura 2.8. Método de tomografía	21
Figura 1.9. Técnica de PIV	22
Figura 1.10 Estructuras de flujo generadas en un tanque agitado. (a) Fluorescencia inducida por láser; (b) Trayectografía.	25
Figura 1.11 Estructuras de flujo formadas arriba y debajo de una turbina Rushton excéntrica con respecto a la línea central del tanque de mezclado (Ascanio <i>et al</i> , 2006).	28
Figura 3.1. Montaje experimental del sistema de mezclado.....	30
Figura 3.2. Configuración de agitadores	31
Figura 3.3. Método de colorimetría.....	33
Figura 3.4 Gama de colores empleado para la medición del tiempo de mezclado	33
Figure 3.5. Espacio de color del modelo HLS	35
Figura 3.6. Principio del método de PIV. (Dantec Dynamics, 2010).....	37
Figura 3.7. Diferentes posiciones angulares estudiadas con el arreglo de agitador propuesto.	38
Figura 4.1. Estructuras de flujo generadas por una turbina Rushton centrada (Tiempo en minutos)	39
Figura 4.2. Estructuras de flujo generadas por una turbina Rushton descentrada (Tiempo en minutos)	40

Figura 4.3. Estructuras de flujo generadas por dos turbinas Rushton centradas (Tiempo en minutos)	41
Figura 4.4. Estructuras de flujo generadas por dos turbinas Rushton descentrada (Tiempo en minutos)	42
Figura 4.5. Estructuras de flujo generadas por dos turbinas Rushton unidas por dos placas delgadas a un ángulo de 180 grados en posición centrada (Tiempo en minutos)	42
Figura 4.6. Estructuras de flujo generadas por dos turbinas Rushton descentradas y unidas por dos placas delgadas a un ángulo de 180 grados en posición descentrada (Tiempo en minutos).....	43
Figura 4.7. Evolución de la homogeneidad en el proceso de mezclado con los diferentes arreglos de turbinas estudiados.....	52
Figura 4.8. Campos de velocidad y líneas de corriente en una turbina Rushton, a) centrada y b) descentrada (escala en la barra en mm/s).	58
Figura 4.9. Campos de velocidad y líneas de corriente en dos turbinas Rushton, a) centrada y b) descentrada (escala en la barra en mm/s).	60
Figura 4.10 Campos de velocidad y líneas de corriente en dos turbinas Rushton unidas: a) Centrada a 0 grados; b) Descentrada a 0 grados; c) Centrada a 60 grados; d) Descentrada a 60 grados; e) Centrada a 120 grados; f) Descentrada a 120 grados. (escala en la barra en mm/s).....	62
Figura 4.11. Mapas de vorticidad generados por una turbina Rushton, a) centrada y b) descentrada (escala en la barra en s^{-1}).....	65
Figura 4.12. Mapas de vorticidad generados por dos turbinas Rushton, a) centradas y b) descentradas (escala en la barra en s^{-1}).....	65
Figura 4.13 Mapas de vorticidad generados por dos turbinas Rushton unidas por dos placas de acero: a) Centrada a 0 grados; b) Descentrada a 0 grados; c) Centrada a 60 grados; d) Descentrada a 60 grados; e) Centrada a 120 grados; f) Descentrada a 120 grados. (escala en la barra en s^{-1})	67
Figura 4.14. Mapa de vectores generado por una turbina Rushton	71
Figura 4.15. Velocidad vertical de una turbina Rushton: a) centrado y b) descentrado.....	75

Figura 4.16. Velocidad vertical de dos turbinas Rushton: a) centradas y b) descentradas..... 75

Figura 4.17 Velocidad vertical de dos turbinas Rushton unidas por dos placas de acero: a) Centrada a 0 grados; b) Descentrada a 0 grados; c) Centrada a 60 grados; d) Descentrada a 60 grados; e) Centrada a 120 grados; f) Descentrada a 120 grados. (escala de la barra en mm/s)..... 76

Índice de tablas

Tabla 4.1. Mezclado con un agitador centrado.....	46
Tabla 4.2. Mezclado con un agitador descentrado.....	47
Tabla 4.3. Mezclado con dos agitadores centrados	48
Tabla 4.4. Mezclado con dos agitadores descentrados	49
Tabla 4.5. Mezclado con dos agitadores conectados centrados.....	50
Tabla 4.6. Mezclado con dos agitadores conectados descentrados	51
Tabla 4.7. Consumo de energía en el proceso de mezclado	55
Tabla 4.8. Números de bombeo en los diferentes arreglos de agitadores	69
Tabla 4.9. Balance de flujo volumétrico para las distintas configuraciones de agitadores estudiadas	73

Símbolos

<i>Re</i>	Número de Reynolds
<i>Fr</i>	Número de Froude
<i>N_{We}</i>	Número de Weber
<i>Po</i>	Número de potencia
<i>N_{Qc}</i>	Número de circulación o de bombeo
<i>μ</i>	Viscosidad
<i>ρ</i>	Densidad
<i>N</i>	Velocidad del agitador
<i>D</i>	Diámetro del agitador
<i>g</i>	Aceleración de la gravedad
<i>σ</i>	Tensión superficial
<i>P</i>	Potencia consumida por el agitador
<i>Q_c</i>	Flujo volumétrico del agitador
<i>T</i>	Diámetro del tanque
<i>C</i>	Claro del tanque
<i>H</i>	Altura del tanque agitado
<i>D_c</i>	Diámetro de la caverna
<i>τ_y</i>	Esfuerzo de cedencia
<i>X*</i>	Excentricidad del agitador
<i>x</i>	Distancia entre el centro del tanque y el centro de la turbina desplazada
<i>T</i>	Radio del tanque de mezclado
<i>τ</i>	Par de torsión
<i>t</i>	Tiempo de mezclado
<i>ω</i>	Vorticidad
\vec{v}	Vector velocidad
<i>V_r</i>	Velocidad en la dirección del eje r en coordenadas cilíndricas
<i>V_z</i>	Velocidad en la dirección del eje z en coordenadas cilíndricas
<i>V_i</i>	Velocidad adquirida por el fluido entre la frontera de la 'paleta del agitador y el líquido
<i>V**</i>	Velocidad adimensional
<i>V_{fluido}</i>	Velocidad instantánea en dirección vertical que presenta el fluido en función de

	su posición en el tanque de mezclado
$V_{periférica}$	Velocidad del agitador en la punta de la paleta
R^*	Posición radial adimensional
r_{fluido}	Posición radial medida desde el centro del agitador hasta un punto medido del tanque
r	Radio del agitador

Resumen

El mezclado es una operación unitaria por medio de la cual los materiales son puestos en contacto con el fin de alcanzar un cierto grado de homogeneidad. Esta operación se encuentra en la industria de proceso e involucra cambios tanto químicos como físicos. Los problemas en el proceso aparecen al presentarse un pobre contacto entre las fases involucradas.

Existen muchos factores que afectan el mezclado, entre los más importantes se encuentran el consumo de potencia, tiempo de mezclado, la circulación de fluido en el interior del tanque, la formación de zonas segregadas o zonas muertas. En su conjunto estas variables determinan la eficiencia en el proceso de mezclado y la calidad del producto final.

En este proyecto doctoral se estudiaron principalmente los problemas de mezclado presentes en régimen laminar, con un fluido viscoso. Bajo estas condiciones se observa la aparición de pseudo-cavernas, las cuales se definen como zonas bien mezcladas alrededor del agitador, cuya rotación y movimiento es cíclico. De la misma forma se observan zonas segregadas en el interior del tanque, las cuales son regiones donde los componentes no se logran mezclar debido al bajo movimiento del fluido generado por el agitador.

Para evitar la formación de estas zonas no deseadas durante el proceso, se propone generar perturbaciones geométricas provocando un mayor movimiento del fluido en el interior del tanque. Para este fin se propone descentrar el agitador y diseñar una nueva geometría de agitador para mejorar el desempeño en el proceso de mezclado.

Se estudiaron tres arreglos de agitadores, una turbina Rushton, dos turbinas Rushton coaxiales y dos turbinas Rushton coaxiales unidas por dos pequeñas placas de acero colocadas a 180 grados entre sí; este último fue el arreglo que se propuso para mejorar el nivel de homogeneidad en el interior del tanque de

mezclado. Todas estas configuraciones fueron estudiadas en posición centrada y con una excentricidad de 25 mm.

Se empleó glicerina pura (grado USP) con una viscosidad dinámica de 1.4 Pa·s y densidad de 1250 kg/m³ como fluido de estudio. El flujo al interior del tanque de mezclado se visualizó mediante las siguientes técnicas: 1) Colorimetría, con la cual se estudiaron tiempos de mezclado y 2) Velocimetría de imágenes de partículas (PIV), con la cual se estudió capacidad de bombeo del agitador y los patrones de flujo generados por cada uno de los arreglos propuestos.

Los resultados obtenidos por el método de colorimetría fueron analizados mediante una técnica de procesamiento de imágenes, a partir de la cual se determinó con mayor exactitud, el nivel de homogeneidad y el tiempo de mezclado para cada escenario propuesto. Con esta técnica, se encontró que el agitador propuesto alcanza un mayor grado de homogeneidad en el interior del tanque, pero consume mayor potencia. Por el contrario la turbina Rushton provee el menor grado de homogeneidad y a su vez el menor consumo de potencia.

La técnica de PIV reveló los patrones de flujo generados por los diversos escenarios de agitadores estudiados. Esta técnica reveló la ubicación de las estructuras generadas durante el mezclado, así como de las zonas con poca circulación de fluido. Se determinaron las velocidades presentes en el interior del tanque y se calculó la vorticidad del fluido. De esta manera, se encontró que el diseño de agitador propuesto genera mayores velocidades en el fluido, siendo estas superiores al doble de las velocidades alcanzadas con los otros dos arreglos de agitadores estudiados. Esta misma tendencia se presentó también para el cálculo de la vorticidad.

Con esta misma técnica se realizó el cálculo de la capacidad de bombeo para cada agitador estudiado, encontrando mayores valores para los arreglos con mayor área de contacto entre el fluido y el agitador. En el arreglo de una turbina Rushton se encontró que la capacidad de bombeo se duplica al descentrar el agitador, lo cual no ocurre con los otros dos arreglos de agitadores estudiados.

Cuando se compara tiempo de mezclado, nivel de homogeneidad, consumo de potencia, patrones de flujo generados, capacidad de bombeo y vorticidad, se encuentra que ningún arreglo de agitador obtiene las mejores prestaciones para todas estas variables; sin embargo, el arreglo propuesto, es el que proporciona los mejores resultados para la mayoría de ellas, siendo su menor prestación el consumo de potencia y la mayor prestación el alto nivel de homogeneidad alcanzado en un corto tiempo de mezclado.

Abstract

Mixing is a key unit operation by which materials are brought together to obtain or achieve a certain homogeneity level. This operation is frequently found in many industrial process involving essentially both physical and chemical changes. Mixing problems occur when a poor contacting among the phases involved appears.

There are many factors involved in the mixing process, namely: the mixing time, flow rate inside the tank, flow structures such as segregated areas and dead zones, which together affect the efficiency and as a consequence the final product quality.

This work deals with hydrodynamics of a stirred vessel under the laminar regimes with viscous fluids under steady and unsteady stirring conditions. It is well known that laminar mixing is in general inefficient due to the flow structures formed in the beginning of the process. Segregated regions such as pseudocaverns defined as well-mixed zones surrounding the impeller and dead zones far away from them leads to very long or infinite mixing times. In order to avoid such regions it is proposed the use of geometrical perturbations by using a new impeller array eccentrically placed in the tanks. Three different impeller configurations were investigated in this work: a single Rushton turbine, two coaxial Rushton turbines and two coaxial Rushton turbines coupled by two thin plates spaced at 180°. For comparison purposes, impellers array were centrally and eccentrically placed at 25 mm for studying the hydrodynamics under steady and unsteady conditions, respectively.

Pure glycerol (USP grade) having a viscosity of 1.41 Pa·s and density of 1250 kg/m³ was used as Newtonian working fluid. Flow was visualized by using two different techniques: 1) Colorimetry, which allowed measuring mixing times and 2) Particle Image Velocimetry (PIV) to obtain the flow fields.

An image processing technique was developed for the accurate measurement of mixing times allowing also determining the homogeneity level during the process. It

is important to mention that the power draw by the impeller arrays as well as the energy required to achieve a certain degree of homogeneity was obtained by measuring the torque under the operating conditions used in this works. On the other hand, PIV experiments were used for analyzing the flow fields in the stirred vessel revealing also the presence of well-mixed regions and dead zones. Data obtained from PIV experiments were later post-processed to obtain useful information such as the vorticity and the pumping capacity.

After comparing the results, it was observed that the best performance in terms of mixing time, homogeneity level, pumping capacity and vorticity, was obtained when using the array consisting of two coaxial Rushton turbines coupled the by thin plates. Although, such configuration required the maximum level of power, the mixing energy to achieve a specific degree of homogeneity was the lowest of the configurations investigated.

1 Introducción

1.1 Generalidades

El mezclado es una operación que se presenta cotidianamente en las actividades realizadas por el ser humano. En muchas ocasiones se requiere que dos o más líquidos miscibles o inmiscibles sean agitados para obtener un producto con características específicas. Existen muchos ejemplos de este tipo de operaciones, entre los más comunes se encuentra el mezclado de líquidos de diferente viscosidad, sin llevar a cabo un proceso que involucre transferencia de calor ni masa. Una de las estrategias más utilizadas para resolver este tipo de problemas, consiste en emplear un motor con un dispositivo acoplado en su extremo el cual genera un movimiento de rotación o traslación. A este dispositivo se le conoce como impulsor y existen en una gran variedad y formas.

Uno de los factores que colocan al proceso de mezclado entre las operaciones unitarias más estudiadas es la gran cantidad de procesos industriales que involucran al mezclado como parte fundamental en su producción. Al momento de elegir un proceso de mezclado para una aplicación industrial particular surgen dos preguntas a responder: 1) ¿Qué se quiere mezclar?, y 2) ¿Cómo seleccionar el equipo de mezclado adecuado para la aplicación en particular?

El mezclado tiene como principal objetivo alcanzar cierto nivel de homogeneidad para obtener un producto con la calidad deseada. Para alcanzar esta condición, resulta importante el movimiento de la materia prima de una región a otra dentro del recipiente utilizado en el proceso. Los recipientes más comúnmente utilizados tienen forma cilíndrica (aunque existen otros tipos como cuadrados o esféricos). Además, diferentes agitadores han sido propuestos, dependiendo del tipo de fluido o régimen de mezclado.

Si el objetivo del mezclado es alcanzar un determinado grado de homogeneidad, es necesario entender la manera en la cual el líquido alcanza esta condición. En este tipo de operaciones, es necesario estudiar el flujo generado por el agitador y

determinar si existe movimiento en todas las regiones del tanque de mezclado. A partir de estos resultados, es importante determinar si el flujo generado por el agitador reduce las heterogeneidades presentes en el proceso. Existen diferentes regímenes de flujo en el proceso, laminar, turbulento o con una zona intermedia entre ambas conocida como zona de transición. Frecuentemente estos regímenes ocurren simultáneamente durante el mezclado y se localizan en diferentes puntos del recipiente (Tatterson *et al*, 1991; Coulson y Richardson, 1993).

El mezclado turbulento ocurre más rápido que el mezclado laminar, aunque los fluidos de alta viscosidad se recomienda agitarlos en régimen laminar debido al alto consumo de energía. Por otro lado, es también importante considerar las propiedades reológicas de los fluidos, como la pseudoplasticidad, ya que debido a esta propiedad se podrían afectar los fluidos sensibles al corte y afectar de esta manera la calidad del producto final.

Muchas de las operaciones de mezclado se llevan a cabo a bajos o moderados números de Reynolds, en condiciones donde el flujo turbulento no puede llevarse a cabo, provocando la aparición de zonas segregadas lo cual genera tiempos largos de mezclado. Estas zonas muertas o segregadas se localizan principalmente en las regiones más alejadas del impulsor, donde el movimiento generado por el mismo es mínimo y la zona permanece prácticamente estática. Otro factor que viene generalmente acompañado con la formación de zonas muertas es la generación de zonas bien mezcladas y comunmente localizadas alrededor del agitador o por encima y debajo del mismo; este tipo de estructuras han sido estudiadas por varios investigadores (Galindo *et al*, 1996; Amanullah *et al*, 1997; Ascanio *et al*, 2002 y 2006). Estos problemas localizados durante el mezclado han motivado la realización de numerosas investigaciones en busca de encontrar la mejor solución.

La técnica de colorimetría se encuentra entre los métodos más simples para la observación de las regiones mezcladas y las regiones segregadas, así como para la determinación de tiempos de mezclado en tanques de agitación. Esta técnica consiste básicamente, en una reacción de neutralización ácido-base y el uso de un

indicador sensible al cambio de pH de la mezcla (Desouza y Pike, 1972). Basándose en esta misma técnica se han reportado diversos trabajos, en fluidos que presentan esfuerzos de cedencia (Solomon, 1981), en fluidos newtonianos (Alvarez *et al*, 2002; Ascanio *et al*, 2002), en bioreactores (Alvarez *et al*, 2005).

Existen diversas estrategias para reducir este tipo de estructuras en el tanque de mezclado, entre ellas se encuentran: el cambio de velocidad o sentido de giro del impulsor (Yao *et al*, 1998), uso de agitadores coaxiales en el tanque de mezclado (Tanguy *et al* 1996) o utilizando dos flechas y motores independientes (Ascanio *et al*, 2002) y el empleo de agitadores excéntricos (Alvarez *et al*, 2002; Ascanio *et al*, 2002; Montante *et al*, 2006). Esta última es una alternativa muy atractiva para el mezclado en fluidos viscosos, newtonianos y no newtonianos. Sin embargo, poco se ha reportado en la literatura sobre la hidrodinámica de flujo en el interior de los tanques agitados empleando dicha alternativa. Al utilizar excentricidad en los tanques de mezclado con agitadores radiales o axiales se ha encontrado una reducción significativa en los tiempos de mezclado (Ascanio *et al*, 2002; Karcz *et al*, 2005).

En este trabajo, se tomaron en cuenta los diferentes aspectos y consideraciones mencionadas anteriormente, proponiendo como consecuencia una nueva alternativa cuyo objetivo principal es obtener un mayor nivel de homogeneidad en el tanque de agitación, reducir el tiempo de mezclado y disminuir el consumo de energía. Para esto se analizaron diversos arreglos de agitadores, empleando turbinas Rushton en cada uno de ellos, en régimen laminar con un fluido viscoso (Glicerina $\mu = 1.41$ Pa.s), cuya finalidad es eliminar la formación de zonas segregadas en el tanque de agitación. En el trabajo se utilizaron el método de colorimetría y el método de velocimetría de imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés), técnicas muy utilizadas en el estudio de la hidrodinámica de fluidos. Ambas técnicas revelan los patrones de flujo de manera sencilla; la primera muestra de forma cualitativa los patrones de flujo y determinar los tiempos de mezclado de manera cuantitativa; la segunda revela de forma cuantitativa los

parámetros asociados a patrones de flujo y permite estimar la capacidad de bombeo generado por los agitadores estudiados.

1.1.1 Grupos adimensionales y regímenes de agitación

En la tecnología de la operación de mezclado, las fuerzas presentes se relacionan normalmente mediante grupos adimensionales. Estos análisis se basan fundamentalmente en el hecho de que las leyes naturales son independientes de las unidades (Tatterson, 1991). Entre los grupos adimensionales más utilizados se tienen:

1. La relación de las fuerzas inerciales F_i y las fuerzas viscosas F_v , se relacionan mediante el número de Reynolds (Re).

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu}$$

2. La relación de las fuerzas inerciales F_i y la fuerza gravitacional F_g , es el número de Froude (Fr).

$$Fr = \frac{N^2 D}{g}$$

3. La relación de las fuerzas inerciales F_i y la fuerza ejercida por la tensión superficial F_σ , es el número de Weber (N_{We}).

$$N_{We} = \frac{N^2 D^3 \rho}{\sigma}$$

4. El número de potencia (Po) se define como:

$$Po = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

5. El número de circulación (N_{Qc}) es:

$$N_{Qc} = \frac{Q_c}{ND^3}$$

donde ρ es la densidad del fluido, N la velocidad angular del agitador, D el diámetro del agitador, P la potencia consumida por el agitador, μ la viscosidad cinemática del fluido, g la aceleración de la gravedad, σ la tensión superficial y Q_c es el flujo volumétrico del agitador.

El proceso de mezclado se desarrolla en diferentes regímenes de flujo, los cuales se determinan a partir de resultados experimentales para los diferentes tipos de agitadores. El régimen es determinado al graficar los números adimensionales Po contra Re . Un ejemplo de este tipo de gráficas se representa en la figura 1.1.

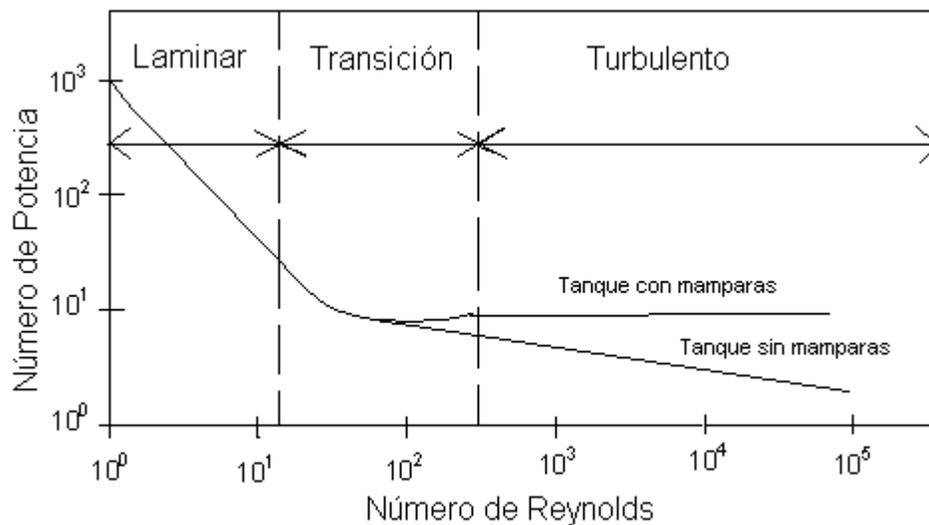


Figura 1.1. Gráfica típica de regímenes de mezclado

Estas gráficas son específicas para cada geometría de agitador estudiado, por lo tanto se obtendrán tanto número de gráficas como agitadores se analicen. En la figura 1.1 se observa, que la región laminar se localiza en la región cuya pendiente

generada entre el Po y el Re permanece constante. La región de transición experimenta un cambio en la pendiente y la región turbulenta presenta nuevamente un valor de pendiente constante, en el caso de un tanque agitado con mamparas el número de potencia permanece constante.

1.1.2 Mecanismos de mezclado

El mezclado es una operación que se lleva a cabo para aumentar las homogeneidades en el producto terminado. El mezclado puede estar acompañado por diversos tipos de mecanismos y equipos. Los agitadores mecánicos son los más utilizados en el proceso de mezclado, aunque el mezclado puede ocurrir por gradientes de concentración o movimientos. Entender la forma en la cual los diferentes sólidos, líquidos o gases se mueven para alcanzar los requerimientos es un prerequisite indispensable para el éxito de la selección o diseño de equipo de mezclado. Los mecanismos que constituyen la operación de mezclado son difusión y convección.

1.1.2.1 Mezclado laminar

El flujo laminar se encuentra asociado normalmente con líquidos de alta viscosidad. Altos consumos de energía en el proceso, en general, viscosidades mayores a 10 Pa.s se requieren para tener flujo laminar (Harnby *et al*, 1992), aunque el régimen de flujo está en realidad en función del número de Re . Una gran cantidad de fluidos con estas características presentan también una reología compleja. Bajo condiciones de flujo laminar, las fuerzas inerciales presentes se anulan por la acción de la alta viscosidad del fluido. En el mezclado laminar el esfuerzo de corte provocan que el fluido se deforme y estire, lo que provoca que el fluido se adelgace y se estire como se muestra en la figura 1.2. Cada vez que un elemento pasa por la zona de alto esfuerzo de corte, se genera un proceso similar pero en una escala pequeña.

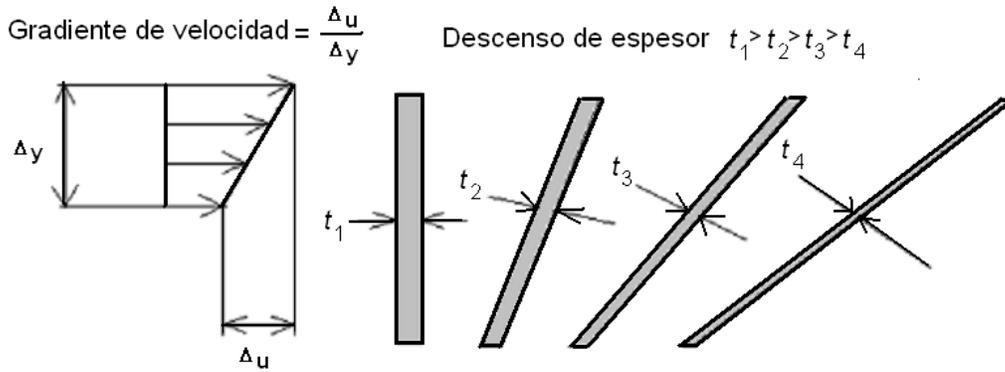


Figura 1.2 Mecanismo de mezclado en régimen laminar

Por supuesto que en régimen laminar la difusión ocurre todo el tiempo. Sin embargo, hasta que el área superficial específica es lo suficientemente grande, la difusión tendrá un valor significativo en el mezclado.

1.1.2.2 Mezclado turbulento

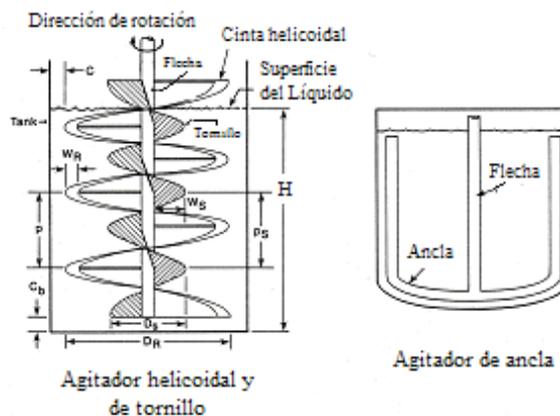
Para líquidos de baja velocidad (menor a 10 Pa·s), el régimen de mezclado con agitadores mecánicos recomendado es turbulento. La inercia generada en el líquido por el agitador rotando es suficiente para causar una rápida circulación del fluido por todo el recipiente contenedor y que regrese al agitador. Los remolinos de difusión turbulenta aparecen y alcanzan un máximo en la región del agitador. Estos remolinos de difusión son más rápidos que la difusión molecular y como consecuencia el mezclado turbulento ocurre más rápido que el régimen laminar. Sin embargo, la complejidad presente en tanques agitados mecánicamente en régimen turbulento, resulta en un análisis de flujo extremadamente complejo.

El mezclado ha sido un tema popular durante los últimos 35 años. El desarrollo de tanques agitados con diferentes tipos de agitadores, ha sido considerado por varios investigadores (Kawase *et al.*, 1997, Rivera *et al.*, 2006, Foucault *et al.*, 2005, Foucault *et al.*, 2006). La geometría del sistema de agitación es importante en el proceso de mezclado.

1.1.3 Geometrías de agitadores

Existen diversos diseños de equipo de agitación, debido principalmente a la variación y problemas encontrados al tratar de incorporar diversos materiales. Actualmente, desde el punto de vista industrial se requieren agitadores que puedan trabajar en régimen laminar, transición o turbulento con un mínimo de modificaciones. Los agitadores clásicos o estándar como los del tipo helicoidal tienen un buen desempeño en el régimen laminar (Yap *et al.*, 1979; De La Villeon *et al.*, 1998). Sin embargo, esta situación es completamente inversa cuando las condiciones cambian de régimen laminar a régimen transitorio o turbulento (Rivera *et al.*, 2006).

Las geometrías de los agitadores son clasificadas típicamente de acuerdo al régimen de mezclado en agitadores laminares o agitadores turbulentos. En general para el mezclado laminar los agitadores empleados ocupan casi en su totalidad el volumen del tanque, como se muestra en la figura 1.3. En este caso, el transporte de momento del fluido en el mezclado laminar es pobre. Estos agitadores requieren poner en movimiento a todo el fluido en el tanque y en la mayoría de las aplicaciones las mamparas no son necesarias y causan una pérdida de momento en el fluido, lo que resulta en un mezclado ineficiente.

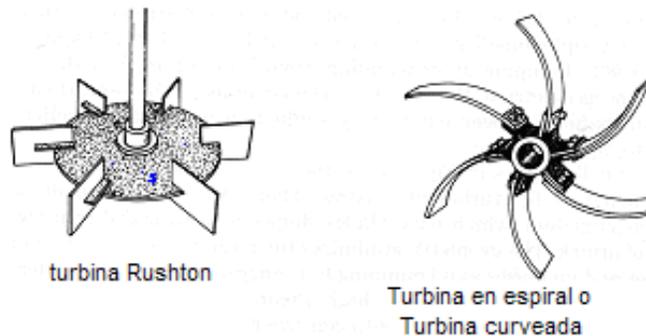


/Figura 1.3. Agitadores para flujo laminar (Tatterson *et al.*, 1991)

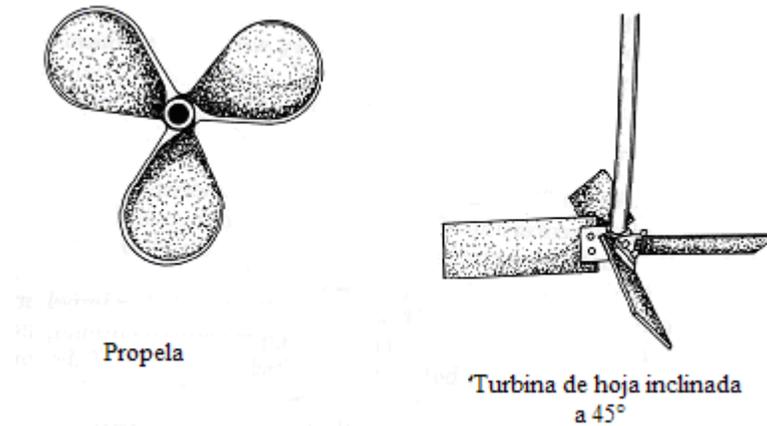
En régimen turbulento los agitadores son clasificados en radiales y axiales. Los agitadores radiales descargan el flujo en la dirección perpendicular al eje del agitador, (figura 1.4a) y los axiales descargan flujo en la dirección paralela al eje

del agitador (Figura 1.4b), de aquí el nombre asignado a este tipo de agitadores. Los agitadores radiales y axiales, usualmente ocupan entre un cuarto y un medio del diámetro del tanque. En este caso la relación diámetro del agitador (D) entre el diámetro del tanque (T) tienen un efecto significativo en la operación de mezclado. La mayoría de los estudios con agitadores reportados en la literatura son de descarga radial, pero a pesar de ello, los agitadores de descarga axial son igualmente importantes (Tatterson, 1991).

Los agitadores para flujo turbulento han sido usados para flujo laminar, pero su aplicación es limitada. Los agitadores de flujo laminar no han sido extensivamente estudiados en flujo turbulento, por lo cual no se pueden evaluar sus aplicaciones. No se debe olvidar que la selección del agitador depende de las aplicaciones y del objetivo del proceso a desarrollar. Aún no existe un agitador que pueda ser llamado universal y cuyo desempeño sea óptimo para todas las aplicaciones.



(a)



(b)

Figura 1.4. Agitadores para tanque de mezclado: (a) flujo radial; (b) flujo axial (Tatterson *et al*, 1991)

En el proceso de mezclado existe un patrón de flujo del fluido que depende fuertemente de la geometría del agitador. A su vez, la calidad del producto es influenciado por el tipo de patrones de flujo presentes en el mezclado.

La mayoría de los investigadores han examinado el tiempo de mezclado y el consumo de potencia de sistemas con agitación, resultando en correlaciones empíricas y específicas para cada arreglo de impulsor (Kumaresan *et al*, 2005, Espinosa-Solares *et al*, 1997).

1.1.4 Tanques de mezclado

El mezclado en tanques es un área importante cuando se considera el número de operaciones que se llevan a cabo en ellos. Los tanques de mezclado se pueden encontrar en diversas formas y geometrías, aunque las más comunes son las cilíndricas (Kato *et al*, 1996) y rectangulares (Franjione *et al*, 1989). Algunas geometrías pueden ser criticadas, pero finalmente la mejor geometría va en función del proceso que se lleve a cabo. Las geometrías estándar de un tanque de mezclado se pueden observar en la figura 1.5, las cuales no son las óptimas en

todos los procesos de mezclado. La estandarización a una geometría específica ha centrado la investigación y supuesto que la geometría estándar es la geometría óptima (Tatterson, 1991).

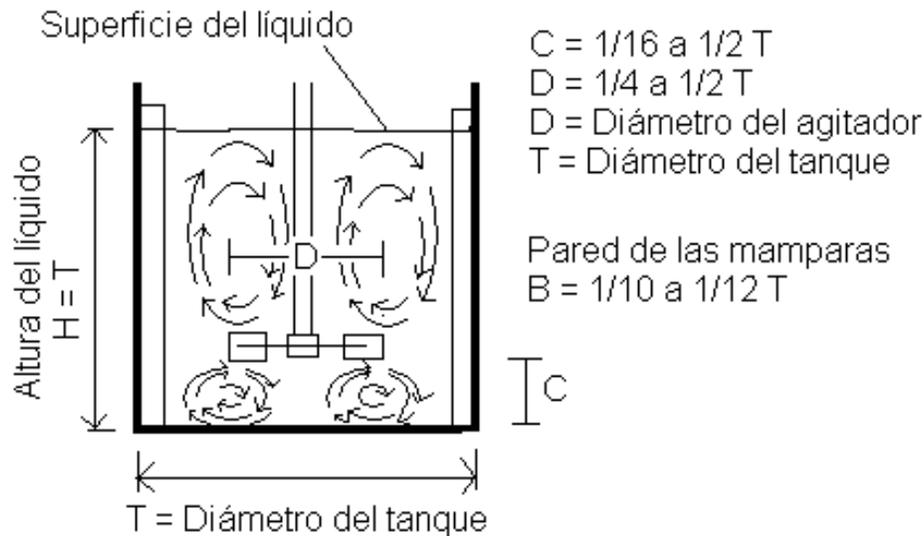


Figura 1.5. Características típicas de un tanque de mezclado

1.1.5 Tiempos de mezclado

El mezclado en régimen laminar o régimen turbulento, ocurren por mecanismos diferentes, pero ambos dependen de una interacción entre dos áreas generadas por el movimiento del agitador en tanques mezclados mecánicamente. El tiempo de mezclado ha sido definido por diferentes autores como el tiempo requerido para alcanzar un grado específico de homogeneidad del fluido en el tanque entero. El cual se puede determinar monitoreando continuamente en el tanque de mezclado, hasta que el tanque alcanza un cierto porcentaje del nuevo estado estable. El

tiempo de mezclado aumenta de forma potencial o exponencial al tratar de alcanzar un mayor grado de homogeneidad.

Algunos investigadores (Ruszkowski y Muskett 1985; 1985; Manna 1997) han desarrollado métodos para determinar el tiempo de mezclado usando un trazador como medida de concentración (figura 1.6). Típicamente, se agrega una pequeña cantidad de trazador a una masa de fluido y su concentración es monitoreada en función del tiempo por medio de diferentes tipos de detectores. A partir de estas medidas se determina el tiempo de mezclado, al alcanzar un porcentaje arbitrario de su valor de equilibrio final, dependiendo de los requerimientos del proceso; este es el tiempo requerido de la varianza de concentración, σ^2 , para aproximarse dentro de una balanza arbitraria a cero y está determinado por la siguiente ecuación

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - C_\alpha)^2}{N - 1}$$

donde C_i es la medida del trazador de concentración por el detector i , C_α es la concentración final de equilibrio y N es el total de números de detectores.

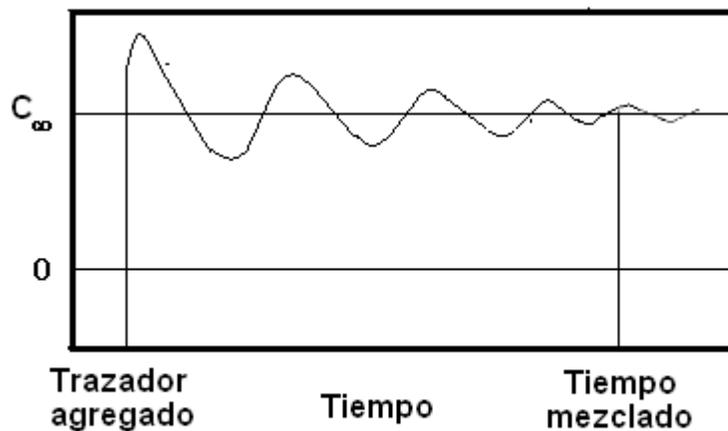


Figura 1.6. Determinación de tiempo de mezclado, utilizando concentración de un trazador

Para determinar tiempos de mezclado, se han utilizado diferentes trazadores y detectores, incluyendo conductividad o cambio de pH. Además se han utilizado sensores de temperatura o termistores con un trazador para conocer así el tiempo de mezclado de acuerdo a la distribución de temperatura presente cuando se le adiciona el trazador (Espinoza-Solares *et al*, 2002).

En la mayoría de los casos, los métodos para determinar tiempos de mezclado son intrusivos y alteran o afectan los patrones de flujo generados durante el mezclado, lo cual se traduce en una determinación de tiempo de mezclado impreciso. Estas técnicas a su vez, resultan en muchos casos costosas y/o complejas, por lo cual se han propuesto técnicas de visualización de imágenes; estas técnicas son menos complejas y no intrusivas (Cabaret *et al*, 2007). En este caso, se utiliza el método de colorimetría cuya fluctuación en el pH de la solución, genera un cambio de tonalidad en el fluido en estudio.

1.2 Técnicas de visualización de patrones de flujo en tanques agitados

Con el fin de poder observar los fenómenos que ocurren en el tanque agitado durante el proceso de mezclado, se han empleado varias técnicas de visualización de fluidos, las principales son descritas a continuación.

1.2.1 Velocimetría mediante ultrasónica-Doppler

Esta técnica basada en el efecto Doppler, usa un pulso ultrasónico junto con diminutas partículas que se mueven con el líquido. La velocidad del fluido es determinada por el cambio en la frecuencia de la onda ultrasónica reflejada y emitida por las partículas y se relaciona con la velocidad del sonido en el fluido y el ángulo formado con respecto a la dirección de propagación del pulso. Al transmitir una serie de pulsos y capturar las resonancias, es posible determinar

casi simultáneamente la velocidad del fluido a varias profundidades (Wächter *et al*, 1996). (El número de canales es fijado por el equipo de instrumentación).

1.2.2 Seguidores de flujo

El empleo de un seguidor de flujo es otra técnica para la identificación de patrones de flujo. El movimiento errante de las partículas en el recipiente es grabado y los patrones de flujo son deducidos de su trazado. Los seguidores de flujo pueden ser simples partículas, fácilmente diferenciables por el efecto de algún colorante y permiten seguir su trayectoria visualmente o usando un video, o más sofisticadamente como la emisión de radio-frecuencia de las partículas y la píldora magnética. Esta técnica fue usada para observar el flujo o medir los tiempos de circulación, los cuales fueron luego usados para validar modelos teóricos o para calcular características del agitador. Esta técnica es conocida como trayectografía y ha sido extendida a trayectorias en 3-D para una mejor representación del flujo actual en los recipientes (Solomon *et al*, 1981, Van Barneveld *et al*, 1987).

1.2.3 Colorimetría

La colorimetría estudia la medida de los colores y mediante su uso se pueden determinar métodos para su cuantificación. En mezclado es utilizada como un medio para estudiar patrones de flujo al usar algún químico o agregar algún color como indicador en el líquido transparente y seguir la trayectoria del fluido. Esta técnica fue usada para demostrar que el flujo es bajo en la parte superior de los recipientes de agitación. Otra posibilidad es la de usar dos reactantes y un indicador de color adecuado. La figura 1.7 muestra una imagen del método. La colorimetría es una técnica no intrusiva y es utilizada generalmente en fluidos transparentes. Esta técnica es utilizada como método de medición de tiempo de mezclado.

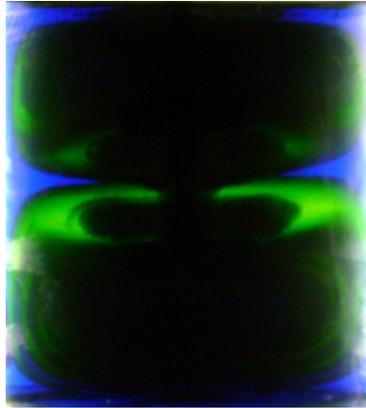


Figura 1.7. Imagen obtenida con el método de colorimetría

1.2.4 Termografía

Un desarrollo aplicable a la visualización de patrones de flujo de la fotografía simple, es el uso de cristales termocrómicos sensitivos dispersos en el líquido. Inicialmente, dado que la temperatura es la misma a través de todo el líquido, los cristales tienen la misma intensidad de color. Cuando una cantidad de líquido caliente es introducido en el interior del recipiente, este chorrea y los patrones de flujo asociado se presentan como un rompimiento en el color de los cristales. Esto es capturado por una videocámara, y los macros son luego analizados digitalmente por su matiz, saturación y ligereza de cada píxel. Mediante esta técnica es posible determinar tiempos de mezclado, así como los efectos de la configuración del recipiente y las condiciones de operación en el proceso de mezclado (Lee y Yianneskis, 1997).

1.2.5 Tomografía

Durante los años setenta la tomografía de rayos-x fue desarrollada para diagnósticos médicos. En esta técnica, un transmisor es posicionado de un lado del cuerpo y un receptor en el otro, capturando la señal que pasa a través del cuerpo y examinando su campo de atenuación, realiza un estimado de la distribución local de densidad de masa, a lo largo del campo que se encuentra bajo la señal. Rotando el sistema alrededor del cuerpo y usando un *software*

apropiado, es posible reproducir la imagen tomográfica de la sección transversal observada. Esta técnica ha sido usada en tanques agitados mecánicamente, para estudiar el flujo en líquidos no newtonianos opacos (figura 1.8); en los que otras técnicas de visualización no son posibles (Elson *et al*, 1986, Holden *et al*, 1999).



Figura 2.8. Método de tomografía

El desarrollo de la tecnología láser en la década de los años 1960-1970 resultó en nuevas formas emergentes para medir velocidades.

1.2.6 Velocimetría mediante láser-Doppler

La técnica es simple, un rayo de láser es dividido en dos rayos coherentes y son enviados al mismo punto dentro del recipiente contenedor del fluido; en el volumen de intersección, paralela a la interferencia, se forma una franja. Cuando una pequeña partícula, atraviesa este pequeño volumen, su ligerísima dispersión, es capturada por un fotodetector. Mediante el análisis de las fluctuaciones en la intensidad de señal sobre el fotodetector, es posible determinar la velocidad de la partícula a través del volumen de intersección (Benayad *et al*, 1985, Adrian, 1996, Baudou *et al*, 1997).

1.2.7 Imagen de velocimetría de partículas (PIV)

Esta es una técnica de extensión natural de la fotografía simple de grabado de rayas de partículas moviéndose en un recipiente de agitación. La técnica emplea una comparación de dos tomas consecutivas a intervalos muy cortos de tiempo. Las fotografías son tomadas en un plano del recipiente, iluminado por un láser pulsado (figura 1.9). Analizando posteriormente el comportamiento de cada partícula tomada en el plano iluminado entre las dos tomas produce un campo de velocidad en 2-D. Si suficientes partículas están presentes, se obtiene posteriormente un mapa del flujo. El cálculo de la velocidad de las partículas depende de la sofisticación del *software*. En el caso de imágenes de poca densidad de partículas, con un programa de identificación de partículas es suficiente, para flujos más complejos, métodos de correlación de imágenes son usados para determinar el vector individual de las partículas (Chang *et al*, 1985, Hall *et al*, 2005)

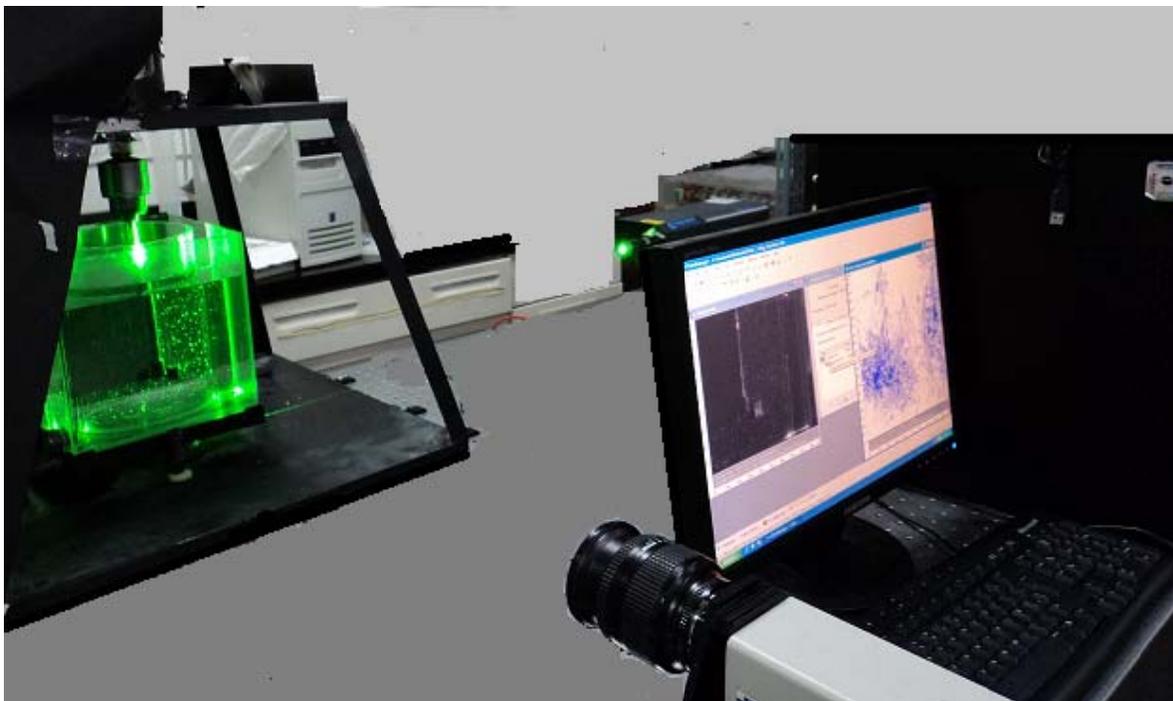


Figura 1.9. Técnica de PIV

1.2.8 Fluorescencia inducida por láser (LIF)

Algunas sustancias químicas como la fluoresceína o la rodamina B son fluorescentes cuando se les ilumina con luz de una longitud de onda apropiada. El láser irradiado ilumina un plano, dentro del recipiente de agitación. El tinte fluorescente que ha sido disuelto en el líquido, es excitado por unos cuantos microsegundos y llega a ser fluorescente, de aquí el nombre de la técnica, Fluorescencia inducida por láser (LIF). La reacción inversa, la cual regresa al tinte a sus condiciones iniciales de no fluorescencia, tiene una vida media que va de unos cuantos segundos a varios minutos, dependiendo de la especie. La técnica fue inicialmente desarrollada para medir concentraciones en un punto determinado, pero posteriormente fue desarrollada para medir simultáneamente concentración y velocidades en un punto dado y la ventaja de la iluminación mediante láser, es que permite la determinación de los patrones de flujo en todo el plano (Kurada, 1994, Unger y Muzzio, 1999).

1.3 Patologías de mezclado en régimen laminar

En tanques agitados, la operación de mezclado se lleva a cabo comúnmente con el impulsor centrado respecto al tanque en condiciones en las cuales las fuerzas viscosas predominan sobre las fuerzas inerciales (régimen laminar). Esto genera, bajo ciertas condiciones, la formación de zonas bien mezcladas cerca del impulsor (Solomon *et al*, 1981) y/o zonas muertas o segregadas lejos de él (Bresler *et al*, 1997), para lo cual se requieren tiempos de mezclado muy largos o infinitos y como consecuencia, el proceso se vuelve ineficiente.

Wichterle y Wein, 1975 observaron la formación de regiones bien mezcladas cerca del impulsor rodeadas por fluido casi estático, las cuales se conocen con el nombre de cavernas en el caso de fluidos que presentan esfuerzo de cedencia. A su vez, Solomon *et al*, 1981, consideraron a la caverna como una esfera con centro en el agitador en una turbina Rushton, cuyo flujo dentro de la caverna es tangencial hasta que alcanza las mamparas.

Se han empleado diversos métodos para determinar el tamaño y forma de las cavernas. Solomon *et al*, 1981 propusieron un modelo para calcular el diámetro de la caverna, este modelo relaciona el diámetro de la caverna, el consumo de potencia y el punto de cedencia de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{D_c}{D}\right)^3 = \left(\frac{1.36}{\pi^2}\right) \left(\frac{P_o \rho N^2 D^2}{\tau_y}\right)$$

donde:

D_c diámetro de la caverna

D diámetro del agitador

P_o potencia

ρ densidad del fluido

N velocidad del agitador

τ_y esfuerzo de cedencia

Elson *et al*, 1986, consideraron a la caverna como un cilindro de altura h_c , encontraron que el diámetro de la caverna es igual al diámetro del impulsor cuando la agitación se lleva a cabo a números de Reynolds (Re) inferiores a 30.

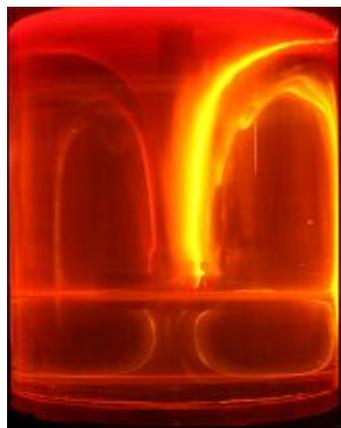
Hirata y Aoshima, 1996, investigaron experimentalmente la forma de las cavernas por medio de técnicas de anemometría láser Doppler, con lo cual determinaron que la caverna se asemeja a un cilindro que se forma alrededor del agitador.

Galindo *et al*, 1996, estudiaron la forma de las cavernas en un tanque de agitación con turbinas Rushton y con agitadores Intermig. Ellos suponen una forma cilíndrica en la caverna, asegurando que el error por suponer esta geometría es bajo. Determinaron un mejor desempeño en el mezclado al utilizar dos turbinas Rushton en vez de utilizar solo una. Concluyen que el diámetro del agitador es más importante que el tipo de agitador utilizado. También determinaron que las turbinas Rushton son mejores que los agitadores Intermig para la formación de cavernas

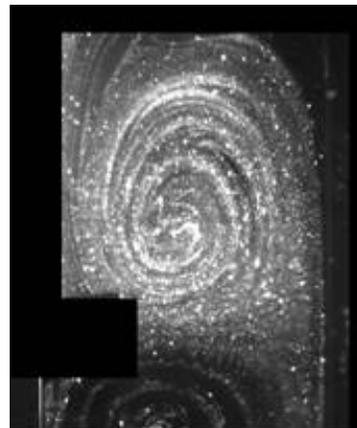
bien mezcladas con bajo consumo de potencia. Amanullah *et al*, 1997, desarrollaron un modelo para predecir diámetros de cavernas usando agitadores de flujo axial en fluidos de reología compleja (en especial aquellos que siguen la ley de la potencia de la viscosidad) como la goma de xantana, caldos de fermentación y algunos polímeros, el modelo es utilizado suponiendo una forma toroidal en la caverna. Lamberto *et al*, 1999, determinaron mediante un estudio numérico la existencia de dos vórtices en forma de anillos formados arriba y abajo del impulsor empleando fluidos newtonianos. Observaron que la posición y tamaño de esas regiones segregadas depende fuertemente del valor del número de Reynolds, así como de la posición de las aspas del impulsor.

Como se mencionó anteriormente, la formación de cavernas en el caso de fluidos con esfuerzo de cedencia o pseudocavernas en fluidos pseudoplásticos o newtonianos, así como las regiones aisladas en el tanque de agitación tienen como consecuencia tiempos de mezclado excesivamente largos o infinitos, lo cual da como resultado un proceso ineficiente.

La figura 1.10 muestra un ejemplo de las estructuras de flujo (pseudocavernas) generadas durante el mezclado en régimen laminar de un fluido newtoniano.



(a)



(b)

Figura 1.10 Estructuras de flujo generadas en un tanque agitado. (a) Fluorescencia inducida por láser; (b) Trayectoria.

Se puede observar un par de anillos de perfil irregular arriba y abajo del agitador, que corresponden a las zonas bien mezcladas. En la Fig. 1.10 (a) el color amarillo intenso (en la figura corresponde a la región más clara) denota los límites de dichas zonas, mientras que al emplear esferas huecas de vidrio como trazadores, se forman un par de vórtices que aparecen como la zona mejor iluminada en la Fig. 1.10 (b).

La manera más sencilla de evitar dichas zonas consiste en aumentar la velocidad de rotación del impulsor, sin embargo, se requiere un mayor consumo de energía para lograr el grado de homogeneidad deseado. Adicionalmente, al aumentar la velocidad de agitación el fluido es sometido a elevados esfuerzos de corte, lo cual puede ser una desventaja cuando se trabaja con materiales sensibles al cizallamiento.

1.4 Estrategias para disminuir zonas segregadas

Para obtener un sistema de mezclado apropiado, en el cual se alcance un alto grado de homogeneidad, se reduzca el tiempo de mezclado y se obtenga un bajo consumo de energía, se han propuesto diversas alternativas. Entre las más estudiadas se encuentran la excentricidad del agitador (Alvarez *et al*, 2002, Montante *et al*, 2006); Agitador rotando a diferentes velocidades o con un cambio de dirección en su sentido de rotación (Lamberto *et al*, 1996, Yao *et al*, 1998); empleo de agitadores operando simultáneamente y de forma independiente (Ascanio *et al*, 2002).

Se ha demostrado que el proceso de mezclado puede ser mejorado notoriamente si el flujo es perturbado de manera continua. Alvarez *et al*, 2002, emplearon técnicas de visualización basada en fluorescencia inducida por láser y Brito *et al*, 1999 con técnicas de colorimetría, todos con fluidos newtonianos para demostrar que los tiempos de mezclado pueden ser reducidos al combinar perturbaciones dinámicas y condiciones asimétricas.

Lamberto *et al*, 1996, estudiaron experimentalmente perturbaciones dinámicas al aplicar un cambio de velocidad de forma periódica en el impulsor, durante la operación de mezclado, encontraron que las zonas segregadas pueden ser destruidas rápidamente al imponer un cambio de velocidad en el impulsor, provocando que algunas fracciones de fluido bien mezclado escapen del interior de las zonas bien mezcladas, causando entrada de fluido sin mezclar y mejorando el nivel de homogeneidad. A su vez, las islas formadas durante el mezclado pueden ser eliminadas con estos cambios hidrodinámicos de velocidad.

Yao *et al*, 1998, realizaron un estudio experimental en el cual también variaban la velocidad de rotación del impulsor y además el sentido de giro con fluidos viscosos. Concluyeron que el tiempo de mezclado puede ser reducido considerablemente, debido a la gran inestabilidad producida por el cambio de velocidad del impulsor. A su vez, la inducción de mezclado caótico producido por el cambio de giro del agitador genera un rápido incremento en el nivel de homogeneidad, traduciéndose en una mejora global en el proceso de mezclado.

Ascanio *et al*, 2002 llevaron cabo un estudio experimental sobre el desempeño de un sistema de mezclado compuesto por dos agitadores excéntricos operados independientemente. Encontraron que, tanto los compartimentos de flujo como las regiones segregadas pueden ser eliminadas, con lo cual los tiempos de mezclado y el consumo de potencia se reduce drásticamente en comparación con los resultados obtenidos al emplear la configuración tradicional (agitador centrado rotando en un solo sentido). Este trabajo sugiere la combinación de diferentes tipos de agitadores en función de la aplicación, por ejemplo una turbina de dispersión y un agitador de bombeo (propela). Por otro lado, se ha observado que a medida que el eje de agitación se desplaza del centro del tanque, las estructuras de flujo adquieren formas irregulares, lo cual fue analizado por Ascanio *et al* (2006), quienes llevaron a cabo la reconstrucción tridimensional de las pseudocavernas en un tanque de agitación mezclando un fluido Newtoniano en condiciones asimétricas. La figura 1.11 muestra los resultados de dicha

reconstrucción, en la cual se puede observar la geometría de los anillos formados arriba y abajo del agitador. En dicha imagen se presentan los anillos extendidos.

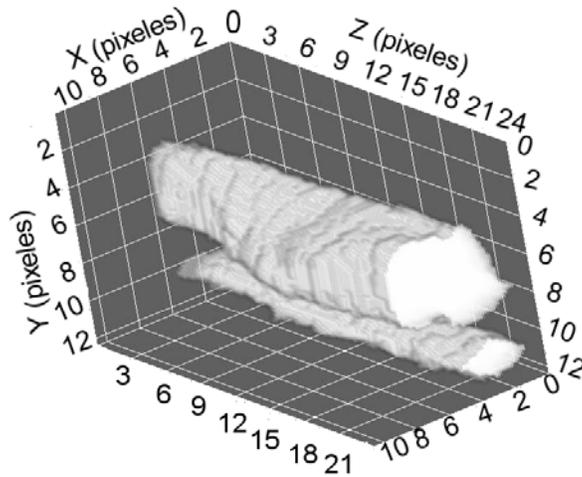


Figura 1.11 Estructuras de flujo formadas arriba y debajo de una turbina Rushton excéntrica con respecto a la línea central del tanque de mezclado (Ascanio et al, 2006).

Ascanio et al (2004) demostraron que las regiones bien mezcladas (pseudocavernas), así como las regiones aisladas formadas en condiciones simétricas con fluidos no newtonianos pueden ser desvanecidas gradualmente si el flujo es perturbado dinámicamente. Los mejores resultados obtenidos fueron con fluidos de moderada pseudoplasticidad agitados con el impulsor rotando intermitentemente a baja velocidad.

Estas alternativas para mejorar el proceso de mezclado, han sido la principal inquietud para realizar este estudio con perturbaciones geométricas en el proceso de mezclado, con un arreglo de impulsor que mejore los niveles de homogeneidad en tiempos de mezclado más cortos.

2 Objetivos:

2.1 General

Estudiar el efecto del uso de perturbaciones geométricas en la hidrodinámica en tanques agitados en el régimen laminar.

2.2 Específicos:

- 1) Determinar tiempos de mezclado y consumo de potencia y energía en tanques agitados con los agitadores en posición centrada y descentrada.
- 2) Estudiar el nivel de homogeneidad alcanzado y los patrones de flujo generados durante el proceso de agitación en el tanque de mezclado.
- 3) Con base en los resultados obtenidos con cada arreglo de impulsores, determinar la configuración que aporta la mayor eficiencia hidrodinámica durante el proceso de mezclado.

3 Metodología y Desarrollo experimental

3.1 Sistema de mezclado

El sistema experimental utilizado durante este proyecto, se muestra en la figura 3.1, el cual está compuesto de un tanque cilíndrico transparente de policarbonato de 165 mm de diámetro interior ($T = 0.165$ m) y 210 mm de altura. La altura del nivel de líquido es igual al diámetro interior del tanque ($T = H$). Con el fin de evitar cambios significativos en el índice de refracción y reducir la distorsión óptica generada por la curvatura del tanque, se empleó una camisa cuadrada que contiene el mismo fluido sujeto a estudio. La velocidad de rotación del impulsor se mantuvo constante a 60 rpm ($N = 1$ rev/s), con lo cual el régimen de agitación fue laminar. La velocidad de rotación se midió con un tacómetro digital. A su vez, se empleó un sensor de par (torquímetro) entre la flecha de agitación y el motor unidos mediante dos acoplamientos flexibles, de tal modo que el valor de la potencia consumida por el agitador pudo ser registrada de manera continúa.

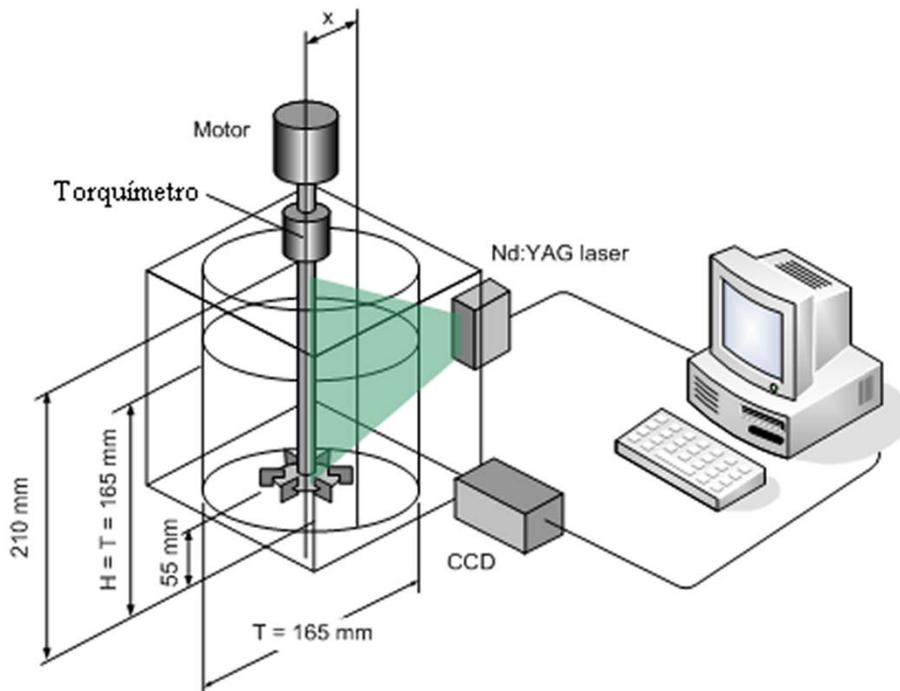


Figura 3.1. Montaje experimental del sistema de mezclado.

Para el estudio se emplearon tres diferentes configuraciones de agitadores: una turbina Rushton, dos turbinas Rushton coaxiales y dos turbinas Rushton coaxiales unidas por medio de dos pequeñas láminas de acero de 80 mm de largo y 10 mm de ancho colocadas a un ángulo de 180° entre ellas (figura 3.2). Esta configuración fue propuesta, debido a que al estudiar las estructuras generadas por una turbina Rushton se observó que estas se destruían al introducir una espátula en la trayectoria de la misma. A partir de lo cual surgió la idea de incorporar estas placas, uniendo ambas turbinas. En todos los arreglos presentados el diámetro del agitador es 55 mm ($D = 0.055$ m). La distancia entre la primera turbina y la segunda turbina, corresponde también a $1/3$ la altura del líquido en el tanque ($D_{t1-t2} = D$). El claro (C) entre las turbinas y el fondo del tanque fue de $1/3$ ($C = D = D_{t1-t2}$).

Los impulsores se montaron sobre una misma flecha en el centro y con una excentricidad de $X^* = 0.3$ ($X^* = x/T$), donde x es la distancia del centro del tanque al centro de la turbina (25 mm) y T es el radio del tanque de mezclado. En los casos con dos turbinas Rushton, la flecha fue colocada a una altura de un tercio en el tanque, medido desde el fondo a la superficie del líquido estudiado.

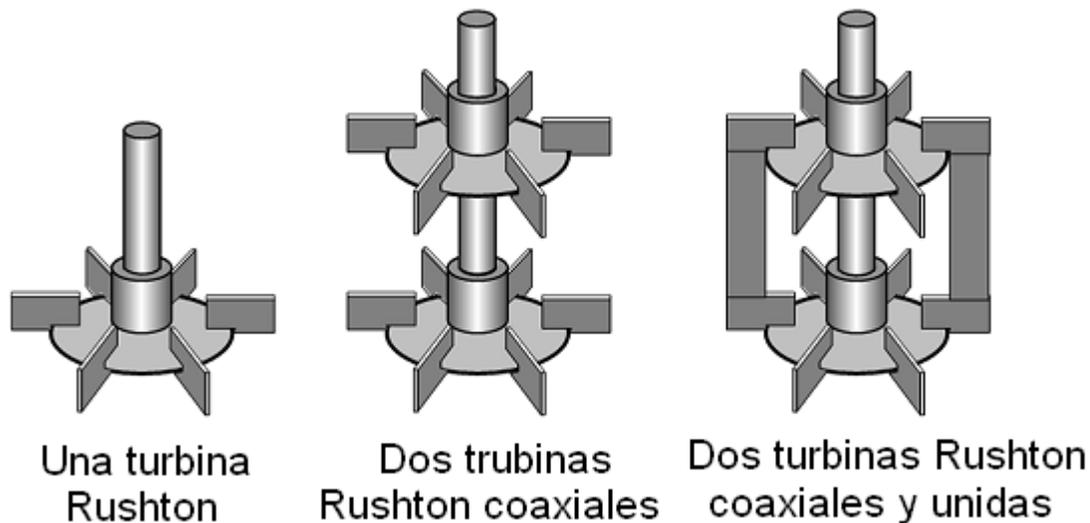


Figura 3.2. Configuración de agitadores

3.2 Métodos de visualización

3.2.1 Colorimetría

El método de colorimetría es una técnica no intrusiva utilizada generalmente en fluidos transparentes. En ella se lleva a cabo una reacción ácido-base en presencia de un indicador, la cual genera cambios de color en la solución estudiada. En este caso la base utilizada es NaOH 1M y el ácido es HCl 1M. El tiempo de mezclado se evalúa mediante los cambios de color de la solución de trabajo. Para tal propósito, se empleó bromocresol verde como trazador, el cual fue mezclado perfectamente antes de iniciar los experimentos. Posteriormente, con el equipo apagado se agregaron pequeñas cantidades de hidróxido de sodio o ácido clorhídrico, mezclado con el fluido de estudio para disminuir las diferencias de densidad (5 ml de NaOH o HCl y 35 ml de fluido de estudio, perfectamente mezclados), en el centro del agitador. Se encendió el equipo de agitación, la acidez de la solución cambia gradualmente y como consecuencia el color de la solución. El tiempo de agitación se registró constantemente con el fin de observar el proceso de homogenización. La técnica de colorimetría es el método de medición de tiempo de mezclado más sencillo, que depende en gran medida del criterio de observador para establecer el momento justo en que el fluido cambia de color. Por tal razón, los experimentos fueron grabados en video digital y posteriormente se analizaron las imágenes con el fin de establecer objetivamente el tiempo de mezclado. En todos los casos estudiados, las condiciones de operación fueron las mismas, la toma de imágenes se efectuó siempre en el tercer cambio de tonalidad, debido a que visualmente se observa mejor el cambio de tonalidad azul a naranja-amarillo. Cada agitador estudiado y para ambas posiciones se llevó a cabo con glicerina fresca. En la figura 3.3 se muestra un experimento de colorimetría llevado a cabo con esta técnica utilizando el sistema de agitador propuesto.

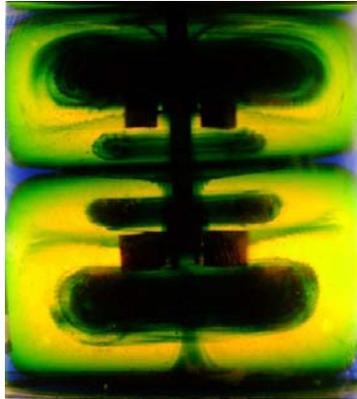


Figura 3.3. Método de colorimetría

3.2.1.1 Procesamiento de las imágenes

Una vez adquiridas las imágenes, se aplica un filtro llamado mediana 7x7 para homogenizar la intensidad de las variaciones de los píxeles en las imágenes y mejorar la calidad de las mismas. Posteriormente, se realiza la segmentación de las áreas de interés (figura 3.4). Este proceso se lleva a cabo de la siguiente manera: a) Se determinan las clases que permiten modelar el proceso de mezclado en tanques en un tiempo determinado, las cuales se definen como:

$$A = \{mezcaldo(M), semimezclado(SM), no mezclado(NM)\} \dots \dots \dots (1)$$

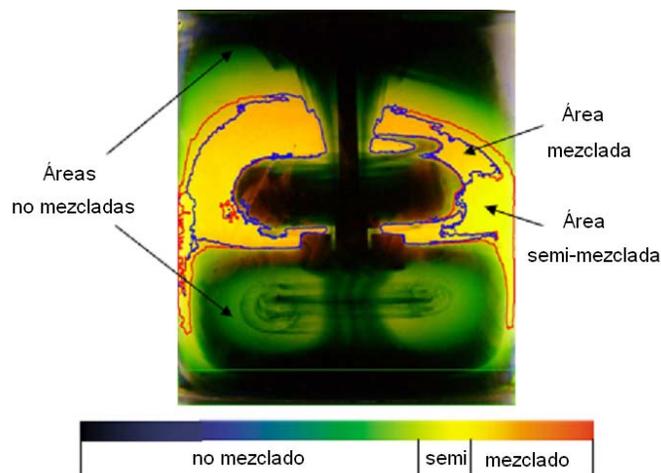


Figura 3.4 Gama de colores empleado para la medición del tiempo de mezclado

El rango de valores de estas clases se caracteriza por medio de los canales de color R (rojo), G (verde) y B (azul) de un conjunto de imágenes de referencia. Se consideró que el color azul define regiones no mezcladas y el color naranja/amarillo regiones bien mezcladas [Alvarez *et al.* 2002].

Si $f(x, y)$ es una función representando una imagen RGB, donde los valores de esta función en cada punto es definida por un vector tridimensional $f(x, y) = (R(x, y), G(x, y), B(x, y))$.

Sea $p(x_i, y_i) \in f(x, y)$ un pixel localizado en la columna x_i y en la fila y_i , la conversión de $p(x_i, y_i)$ de RGB a HLS está definido como:

1) Los valores $R(x_i, y_i), G(x_i, y_i), B(x_i, y_i)$ son normalizados

$$R' = \frac{R(x_i, y_i)}{R(x_i, y_i) + G(x_i, y_i) + B(x_i, y_i)}, \quad G' = \frac{G(x_i, y_i)}{R(x_i, y_i) + G(x_i, y_i) + B(x_i, y_i)}, \quad B' = \frac{B(x_i, y_i)}{R(x_i, y_i) + G(x_i, y_i) + B(x_i, y_i)} \dots\dots\dots(2)$$

2) Después, los componentes normalizados H, L, S son obtenidos mediante:

$$H_i = \begin{cases} \cos^{-1} = \left[\frac{\frac{1}{2}[(R' - G') + (R' - B')]}{\sqrt{(R' - G')^2 + (R' - B')(G' - B')}} \right] & \text{if } B' \leq G', H_i \in [0, \pi] \\ 2\pi - \cos^{-1} = \left[\frac{\frac{1}{2}[(R' - G') + (R' - B')]}{\sqrt{(R' - G')^2 + (R' - B')(G' - B')}} \right] & \text{if } B' > G', H_i \in [\pi, 2\pi] \end{cases} \dots\dots\dots(3)$$

$$S_i = \begin{cases} \frac{\max(R', G', B') - \min(R', G', B')}{\max(R', G', B') + \min(R', G', B')} & \text{if } L_i < 0.5 \\ \frac{\max(R', G', B') - \min(R', G', B')}{2 - \max(R', G', B') + \min(R', G', B')} & \text{if } L_i = 0.5 \end{cases} \quad S_i \in [0, 1] \dots\dots\dots(4)$$

$$L_i = \frac{\max(R', G', B') + \min(R', G', B')}{2} \quad L_i \in [0, 1] \dots\dots\dots(5)$$

Por conveniencia, los valores de H_i, L_i y S_i se convierten dentro del rango de valores (0,360), (0,100), (0,255) por $H_i = H_i \times 180/\pi$, $L_i = L_i \times 255$, $S_i = S_i \times 100$. El modelo de color HLS, descrito en la figura 3.5 se puede considerar como un doble cono para describir los colores como puntos, donde el rango del eje central va del negro en el fondo al blanco en la parte superior y los colores saturados alrededor del contorno de una sección transversal. Los matices (H) son medidos

por el ángulo alrededor del eje vertical que van desde 0 a 360 grados, empezando por rojo a 0°, verde a 120° y azul a 240° dando una medida de la composición del espectro de color. Amarillo, cian y magenta están localizados a 60, 180 y 300 grados respectivamente. La saturación (S) es proporcional a la distancia radial y la intensidad (L) es la distancia a lo largo del eje perpendicular al plano de coordenadas polares.

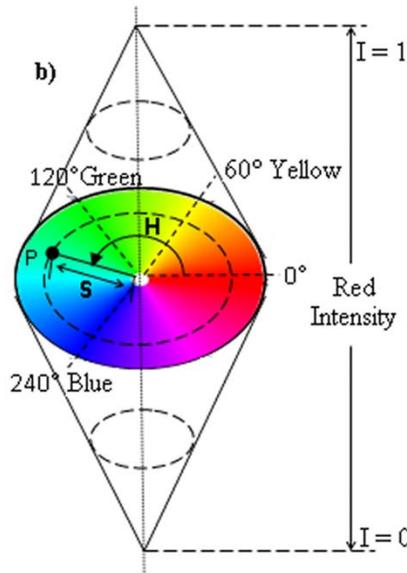


Figure 3.5. Espacio de color del modelo HLS

Sea $p(x_i, y_i) \in f(x, y)$, la clasificación de $p(x_i, y_i)$ en el conjunto de pixeles para las zonas mezcladas (M), semimezcladas (SM) y no mezcladas (NM), definidas como:

$$p(x_i, y_i) \text{ es clasificado en clases } \begin{cases} M & \text{si } 0 \leq H_i \leq \varepsilon_1 \\ SM & \text{si } \varepsilon_1 < H_i \leq \varepsilon_2 \\ NM & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

donde ε_1 y ε_2 son los umbrales de las clases de matices de mezclado. En este caso ε_1 tiene un valor de 50 grados y ε_2 un valor de 80 grados, de acuerdo a la figura 3.5.

3.2.2 Método de PIV (*Velocimetría de imágenes de partículas*)

Con el fin de determinar los perfiles de velocidad y patrones de flujo en el proceso de mezclado se usó la técnica conocida como PIV. Esta técnica emplea como fuente de iluminación un láser pulsado de Nd:YAg con una longitud de onda de 532 nm y energía de 120 mJ. Por medio de un arreglo óptico se genera una cortina de luz de espesor inferior a 1 mm. La cámara fotográfica se coloca de manera perpendicular a dicha cortina de luz con un ángulo de 90°. Como partículas trazadoras se emplean esferas huecas de vidrio del orden de 10 μm de diámetro recubiertas de plata.

La técnica de velocimetría de partículas está basada en imágenes en un plano iluminado en el cual se tiene un par de pulsos de luz. Dichas imágenes se registran en una cámara fotográfica o de video. El desplazamiento de las partículas, que se emplean como trazadores se mide en el plano iluminado, lo cual permite determinar el desplazamiento de las partículas en el flujo. Una vez que dos pulsos de luz son grabados, las imágenes son divididas en pequeñas áreas de interrogación. Estas áreas de interrogación para cada imagen son correlacionadas una con otra, pixel por pixel. La correlación produce un pico de señal identificando el desplazamiento de la misma partícula y su velocidad (Dantec Dynamics).

Todos los experimentos fueron realizados bajo las mismas condiciones de operación, establecidas en el método de colorimetría (misma posición y velocidad de operación del agitador). El proceso, desde la adquisición de las imágenes hasta su procesamiento, se observa en la figura 3.6.

Se eligió esta técnica para la visualización de los patrones de flujo, debido a que se puede conocer el campo completo de velocidades del fluido generado en el interior del tanque de mezclado (Mavros, 2001).

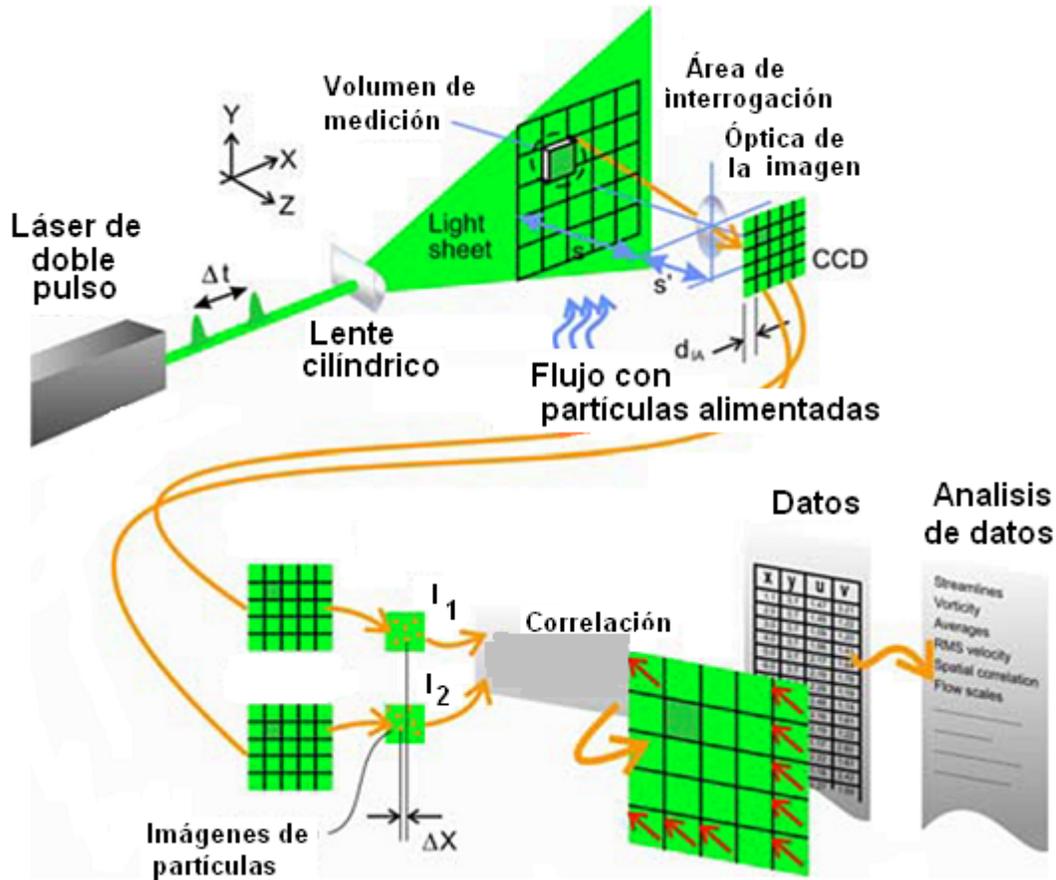


Figura 3.6. Principio del método de PIV. (Dantec Dynamics, 2010)

3.3 Condiciones de operación

Las condiciones de operación empleadas durante el proceso de mezclado son: velocidad del agitador $N = 1$ rev/s con la cual se obtiene un número de Reynolds, $Re = 2.6$, siendo. El fluido de trabajo es glicerina grado USP con $\mu = 1.41$ Pa.s y $\rho = 1250$ kg/m³. Los experimentos se realizaron con el agitador centrado y con una excentricidad de $X^* = 0.3$, seleccionado en base en los resultados obtenidos en investigaciones anteriores, donde encontraron que la excentricidad óptima se localiza entre $X^* = 0.25$ y $X^* = 0.35$ (Alvarez *et al*, 2002). En los experimentos con PIV, se tomaron seis series de 500 fotografías con el fin de obtener una media estadística confiable. Los experimentos se dividieron en dos etapas, La primera se realizó tomando imágenes a intervalos de 480 ms, cuya finalidad era obtener

imágenes para calcular el patrón estadístico promedio durante el proceso de mezclado. En la segunda etapa, las fotografías se realizaron sincronizando el láser al borde de la paleta para los diferentes arreglos de agitadores. Este proceso se realizó mediante la utilización de un codificador óptico (*encoder*) conectado al sistema de PIV en lazo cerrado. Este arreglo da como resultado la toma de cada par de fotografías siempre en la misma posición angular. El tiempo entre cada par de fotos fue un milisegundo. Para el caso de las turbinas conectadas por medio de las pequeñas placas de acero entre ellas, se consideró el estudio de los perfiles de velocidad para cada punta del agitador como se muestra en la figura 3.7.

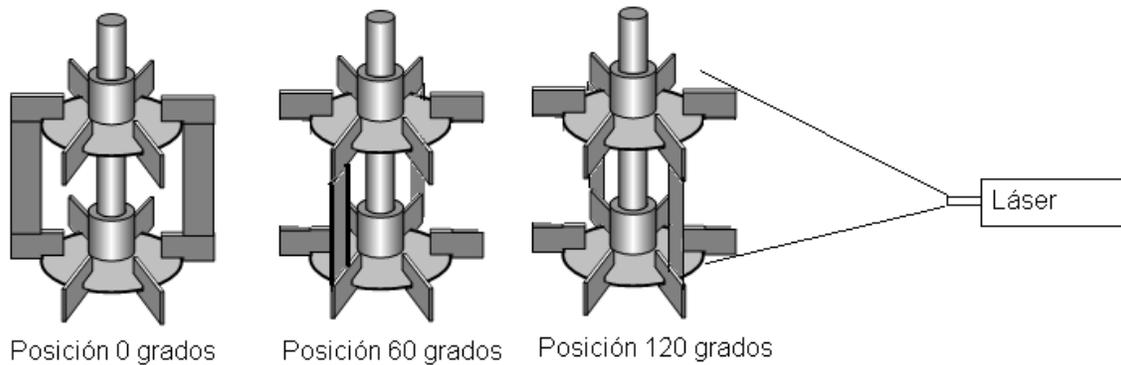


Figura 3.7. Diferentes posiciones angulares estudiadas con el arreglo de agitador propuesto.

En este caso se realizó una serie de pruebas en cada punta del agitador, generando tres imágenes en esta geometría. En los otros dos arreglos de turbinas estudiados, únicamente se obtuvieron imágenes en una paleta de la turbina debido a la simetría que presentan los agitadores.

4 Resultados

4.1 Formación de cavernas

Inicialmente, se analizan los resultados obtenidos en todos los escenarios propuestos con la técnica de colorimetría descrita anteriormente.

Al estudiar los fenómenos que se presentan durante el mezclado en régimen laminar ($Re = 2.5$), se observó la formación de cavernas y regiones estancadas al utilizar turbinas Rushton centradas como medio de agitación. En el proceso de mezclado se presentan estructuras con forma toroidal arriba y abajo del agitador, como se observa en las figuras 4.1 a 4.6. Estas estructuras son formadas generalmente a bajos números de Reynolds, en cuyo caso las fuerzas viscosas tienen un efecto dominante sobre las fuerzas inerciales (Lamberto *et al*, 1996, Alvarez *et al*, 2002).

Al estudiar el proceso utilizando una turbina Rushton centrada, se formaron dos estructuras en forma de toroides, la primera de ellas en la parte superior, la cual permanece estable y la segunda en la parte inferior que prácticamente se mezcla en su totalidad, como se observa en la figura 4.1. Lamberto *et al*, 1996 y 1999, obtuvieron resultados similares observando estructuras generadas que perduraban hasta por más de dos horas de agitación.

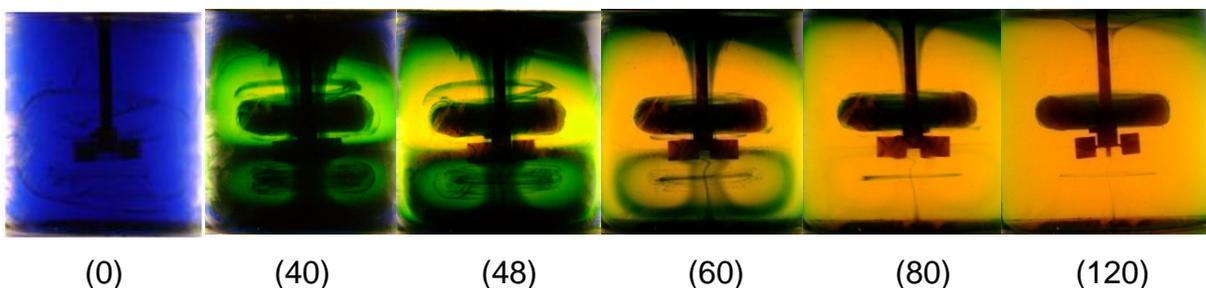


Figura 4.1. Estructuras de flujo generadas por una turbina Rushton centrada (Tiempo en minutos)

Al descentrar la turbina 25 mm, se observa la formación de dos estructuras con diferente configuración y forma, lo que concuerda con lo reportado por Alvarez *et al*, 2002. En este caso, las estructuras toroidales ocupan un menor volumen en el tanque de mezclado y se inclinan en forma asimétrica debido a la cercanía de la turbina con la pared del tanque. Este mismo fenómeno se observa en el trabajo de Alvarez *et al*, 2002, aunque no lo analiza. Esta cercanía provoca que el fluido descargado radialmente por el agitador llegue a la pared del tanque de mezclado y continúe su trayectoria en forma de vórtice hacia el eje del agitador con mayor fuerza. Este movimiento constante del agitador y fluido deforman la estructura de flujo toroidal generado en la parte superior e inferior del agitador. Este fenómeno provoca el aumento en el nivel de homogeneidad en el tanque de mezclado, situación reportada previamente por Lamberto *et al*, 1996 y 1999, Alvarez *et al*, 2002, Ascanio *et al*, 2002 (ver figura 4.2).

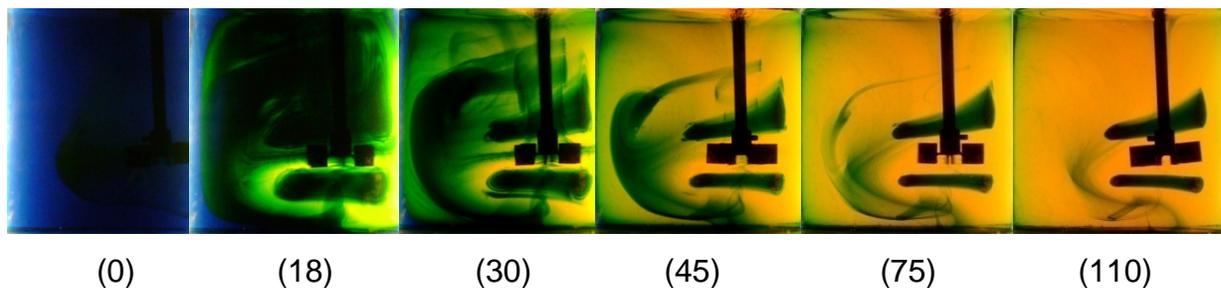


Figura 4.2. Estructuras de flujo generadas por una turbina Rushton descentrada (Tiempo en minutos)

En el caso de las dos turbinas Rushton en posición centrada, se observó la formación de cuatro estructuras con forma toroidal. Dos pares de toroides en cada turbina, una abajo y otra encima como se observa la figura 4.3. Los toroides en la turbina superior son de menor tamaño a los formados en la turbina inferior y el conjunto de los toroides ocupan un menor volumen en el tanque de agitación, en relación a las estructuras generadas al utilizar una sola turbina Rushton.

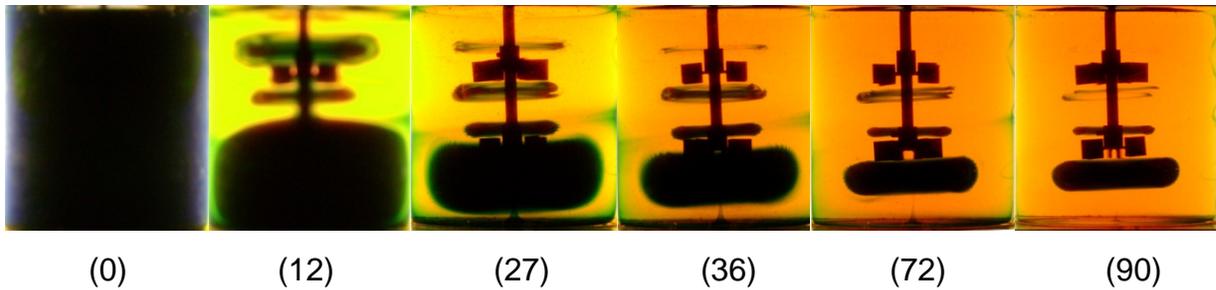


Figura 4.3. Estructuras de flujo generadas por dos turbinas Rushton centradas (Tiempo en minutos)

En el caso de las dos turbinas Rushton descentradas 25 mm, se observa el fenómeno de inclinación de los toroides descrito previamente para el caso de una sola turbina Rushton descentrada. En este caso, la interacción entre las dos turbinas coaxiales y la inclinación del toroide, provocado por la cercanía de la pared del recipiente de mezclado, generan condiciones propicias para la destrucción de los dos toroides formados entre ambas turbinas. En este arreglo se formaron cuatro estructuras con forma toroidal asimétricas, cuyo volumen es menor al volumen ocupado por el arreglo formado por dos turbinas Rushton centradas. En la figura 4.4 se observa la evolución y disminución del tamaño de los toroides de manera gradual con el paso del tiempo. Los resultados obtenidos en estas dos configuraciones de turbinas concuerdan con el trabajo reportado por diversos investigadores (Lamberto *et al*, 1996 y 1999; Alvarez *et al*, 2002 y 2002; Ascanio *et al*, 2002).

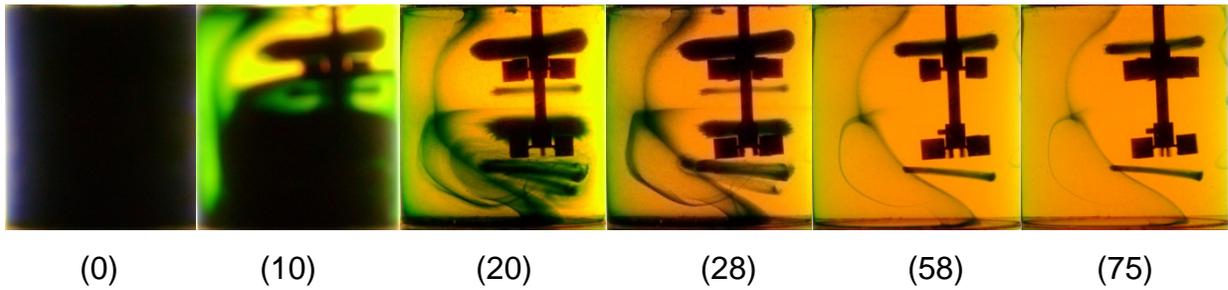


Figura 4.4. Estructuras de flujo generadas por dos turbinas Rushton descentrada (Tiempo en minutos)

En el caso del agitador compuesto por dos turbinas Rushton unidas mediante dos placas de acero se observa la formación del mismo tipo de estructuras con forma toroidal, las cuales tienden a ser destruidas gradualmente hasta desaparecer. La figura 4.5 muestra el proceso de mezclado para este arreglo con el agitador centrado. En este caso, los toroides formados entre ambas turbinas y el toroide superior desaparecen gradualmente durante el proceso de agitación. Este fenómeno es causado por la incorporación de ambas placas entre las turbinas, generando un comportamiento diferente al acoplarse como una sola turbina. Lo que se traduce en un proceso de mezclado más eficiente al ser comparado con los casos analizados previamente.

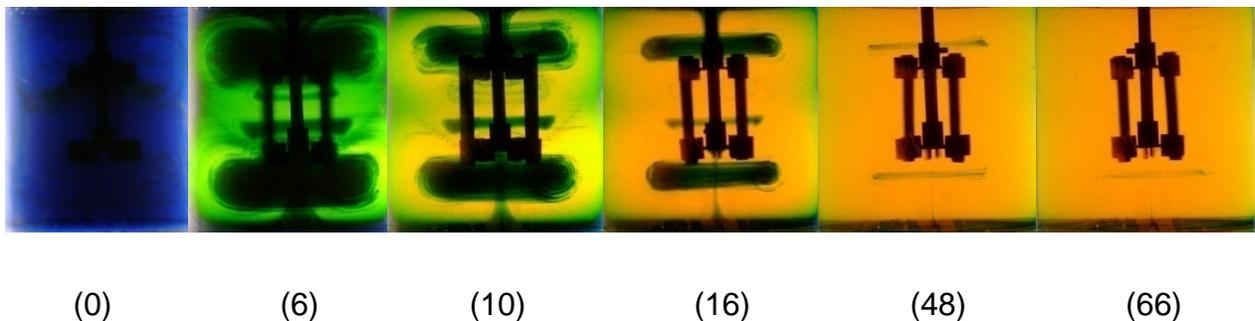


Figura 4.5. Estructuras de flujo generadas por dos turbinas Rushton unidas por dos placas delgadas a un ángulo de 180 grados en posición centrada (Tiempo en minutos)

Finalmente se estudió el arreglo de agitadores anteriormente descrito con un descentramiento de $X^* = 0.3$, con el cual las estructuras de flujo tipo vórtice se redujeron rápidamente en comparación con los escenarios estudiados. Los resultados obtenidos se observan en la figura 4.6, a partir de los cuales se llevó a cabo un estudio más profundo sobre las causas que provocan estas mejoras en el mezclado. En las imágenes se observa la destrucción más rápida de los toroides formados al inicio del proceso de agitación.

El método de procesamiento de imágenes descrito en el capítulo anterior se propuso como una alternativa para dar respuesta a las interrogantes generadas por las imágenes en la figura 4.6. Debido a la necesidad de realizar una cuantificación más precisa y objetiva del volumen ocupado por los toroides y el tiempo que se necesita para cada proceso.

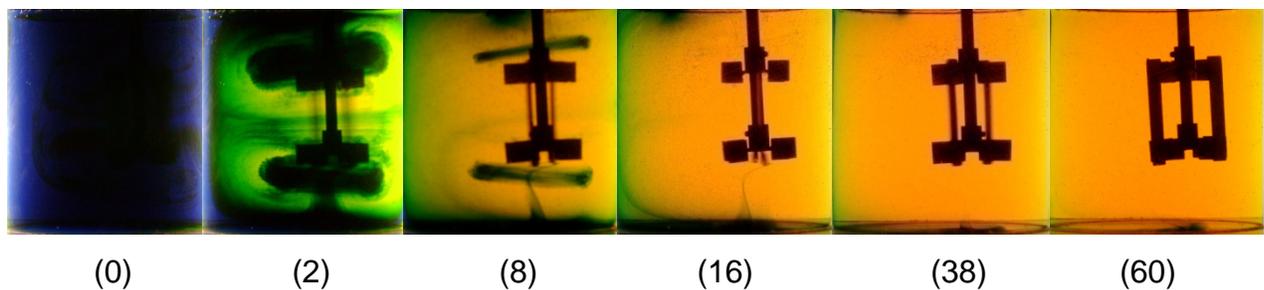


Figura 4.6. Estructuras de flujo generadas por dos turbinas Rushton descentradas y unidas por dos placas delgadas a un ángulo de 180 grados en posición descentrada (Tiempo en minutos)

El método desarrollado de procesamiento de imágenes no se basa en la valoración del ojo humano (debido principalmente al alto error generado por la apreciación), se realiza la cuantificación de las zonas de color homogéneas con base a en los niveles de color rojo, azul y verde de las imágenes tomadas durante

la experimentación, con lo cual es posible determinar el tiempo de mezclado y hacer un comparativo entre los arreglos de agitadores estudiados.

4.2 Tiempo de mezclado

El tiempo de mezclado se determinó mediante la técnica de colorimetría descrita anteriormente. Se analizaron las imágenes de los experimentos, tomadas durante el proceso de mezclado con esta técnica y se procedió a evaluar los niveles de homogeneidad alcanzados en cada una de las configuraciones de agitadores estudiados. Una vez obtenidas las imágenes de todos los experimentos, se realizó la cuantificación de las zonas homogéneas utilizando el análisis de imágenes propuesto en este trabajo.

El tiempo empleado en el proceso es variable y depende de la geometría de impulsor utilizada. El tiempo máximo de agitación para todos los casos fue de 120 minutos. En todos los casos estudiados se utilizó el mismo indicador y fluido, en la misma cantidad y concentración, para evitar posibles alteraciones de viscosidad (Cabaret *et al*, 2007). Para tiempos mayores a 120 minutos, el tiempo de mezclado se consideró como infinito cuando el nivel de homogeneidad fue inferior a 90%. En las tablas 4.1 a 4.6, se observa la evolución en el proceso de mezclado en el tanque de agitación para cada arreglo de agitadores. En ellas se reportan los resultados obtenidos mediante el procesamiento de imágenes. La primera columna muestra el porcentaje de homogeneidad que se define como el área ocupada por el color naranja-amarillo y se considera como zona homogénea entre el área total de la imagen, descontando el impulsor y su eje. En la segunda columna se muestra el tiempo correspondiente a dicha imagen. En la tercera columna se muestra la imagen tomada durante la experimentación, después se reporta esa misma imagen con una selección y fragmentación de las zonas segmentadas. Finalmente, se observa la imagen con una sustitución de las tres áreas determinadas como zona mezclada, zona semi-mezclada y zona no-

mezclada. Este procedimiento se realizó para todos los arreglos de impulsores estudiados en este trabajo.

Cabaret *et al*, 2007, realizó un estudio para determinar el porcentaje de homogeneidad en un tanque agitado basado en los canales de colores rojo, verde y azul (RGB por sus siglas en inglés). El cambio de color del fluido se determina por medio de los umbrales individuales de los canales R-G-B y con ello se provee la información de la evolución del mezclado.

Este método RGB propuesto por Cabaret *et al*, 2007, fue utilizado con fines comparativos con el método propuesto en este trabajo, cuyos resultados se presentan a continuación. En el caso del método RGB solo se evaluaron los componentes verde y rojo debido a que el canal azul no presenta variaciones en su nivel de brillantes. El método se evaluó por separado para el canal verde y el canal rojo, después se procedió a evaluarlos en su conjunto.

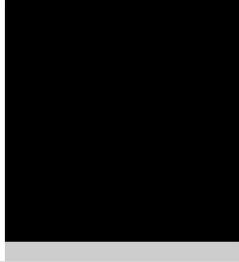
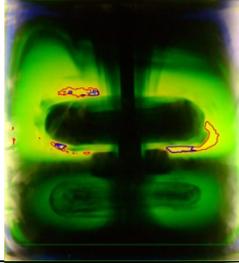
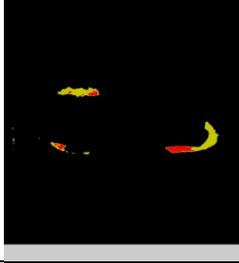
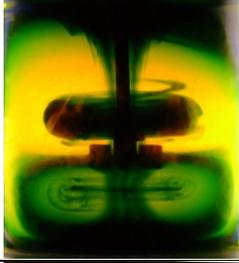
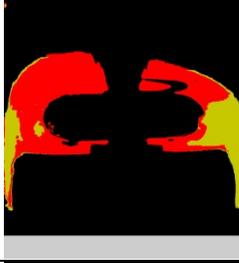
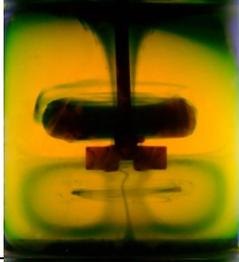
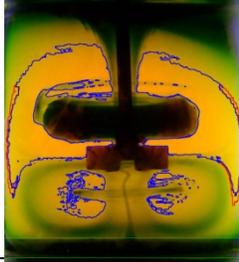
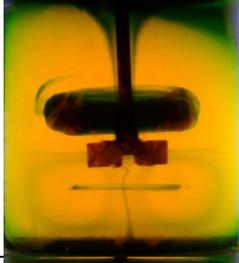
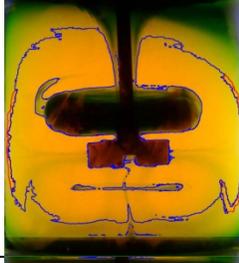
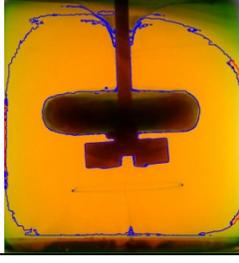
Tabla 4.1. Mezclado con un agitador centrado				
Porcentaje de Homogeneidad	Tiempo (s)	Imagen Original	Imagen Segmentada	Regiones Segmentadas
0 %	0			
0.3 %	2400			
18%	3000			
30%	3600			
51%	4200			
71%	7200			

Tabla 4.2. Mezclado con un agitador descentrado

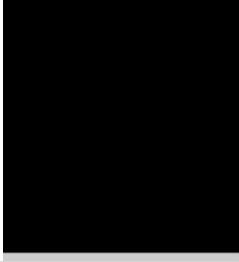
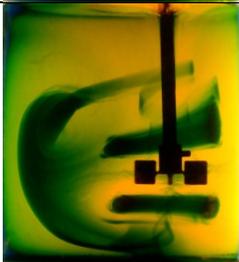
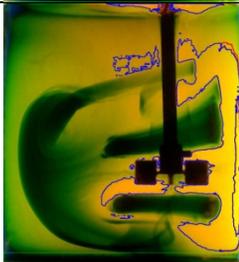
Porcentaje de Homogeneidad	Tiempo (s)	Imagen Original	Imagen Segmentada	Regiones Segmentadas
0 %	0			
0.5 %	900			
16%	1800			
28%	3600			
34%	4200			
73%	6600			

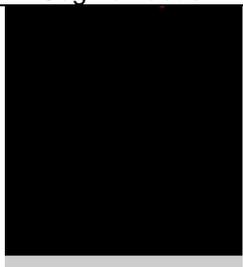
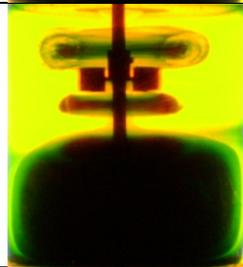
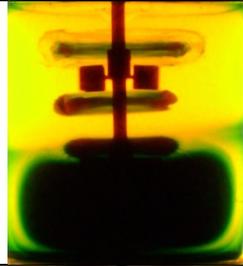
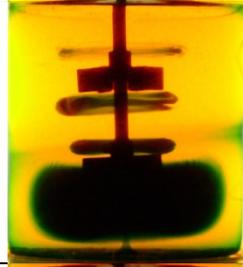
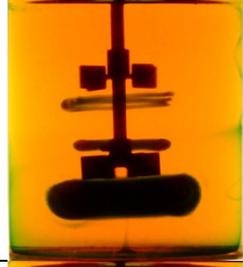
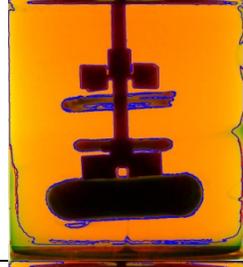
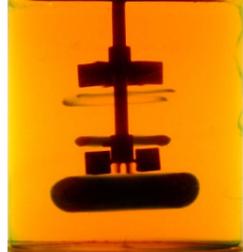
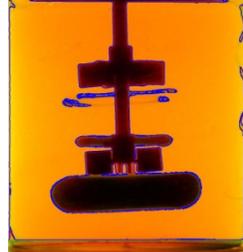
Tabla 4.3. Mezclado con dos agitadores centrados				
Porcentaje de Homogeneidad	Tiempo (s)	Imagen Original	Imagen Segmentada	Regiones Segmentadas
0 %	0			
9 %	900			
27%	1080			
52%	1620			
75%	3240			
85%	5400			

Tabla 4.4. Mezclado con dos agitadores descentrados

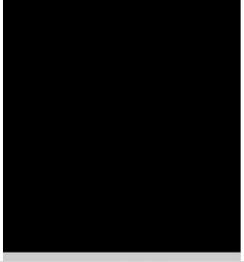
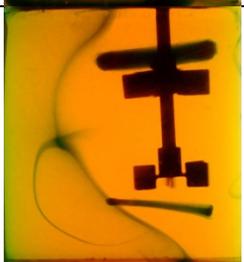
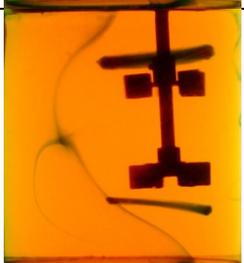
Porcentaje de Homogeneidad	Tiempo (s)	Imagen Original	Imagen Segmentada	Regiones Segmentadas
0 %	0			
6 %	600			
29%	1080			
52%	1500			
75%	3000			
91%	4500			

Tabla 4.5. Mezclado con dos agitadores conectados centrados

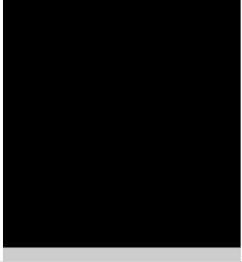
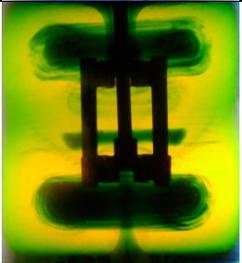
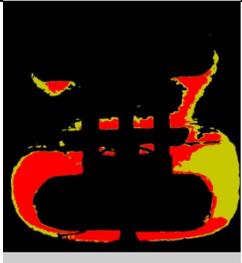
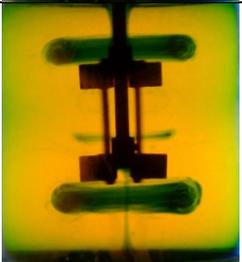
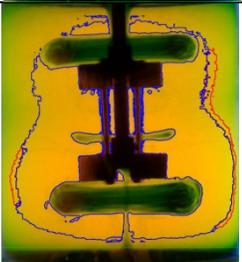
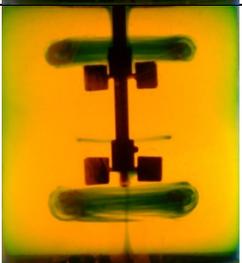
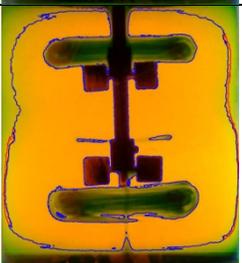
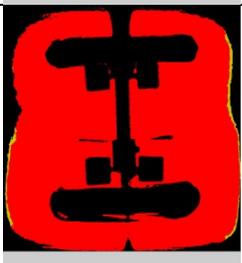
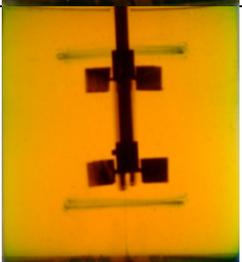
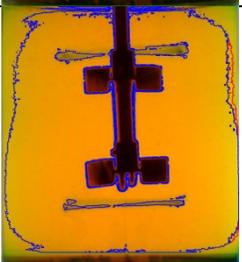
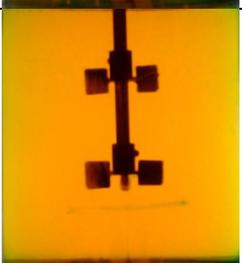
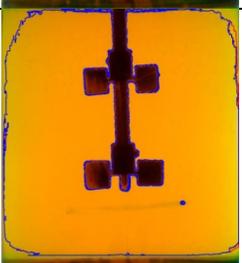
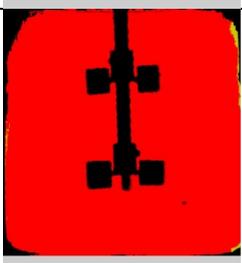
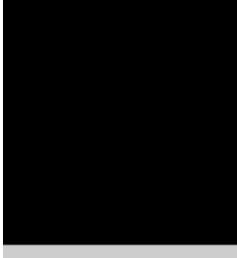
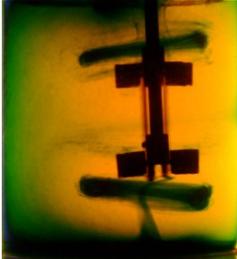
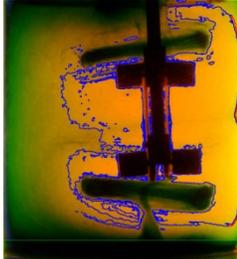
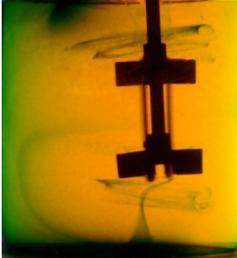
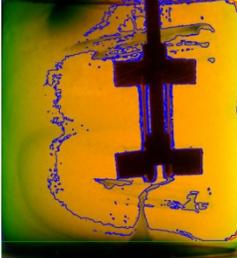
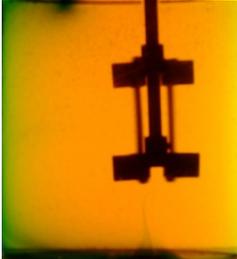
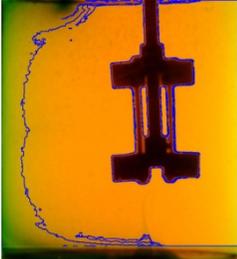
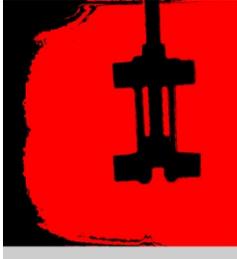
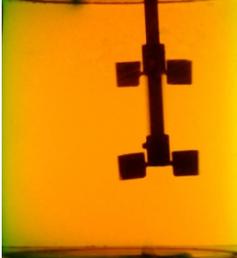
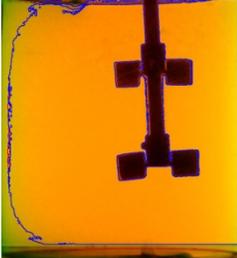
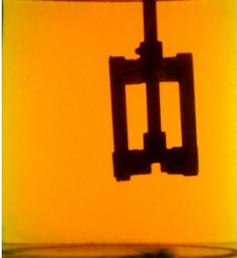
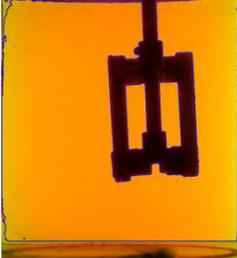
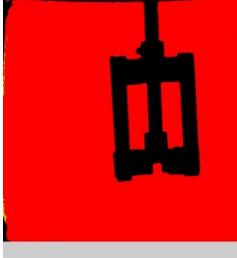
Porcentaje de Homogeneidad	Tiempo (s)	Imagen Original	Imagen Segmentada	Regiones Segmentadas
0 %	0			
12 %	360			
45%	720			
70%	1200			
85%	2160			
95%	3960			

Tabla 4.6. Mezclado con dos agitadores conectados descentrados				
Porcentaje de Homogeneidad	Tiempo (s)	Imagen Original	Imagen Segmentada	Regiones Segmentadas
0 %	0			
35 %	240			
57%	480			
81%	1080			
90%	2040			
97%	3600			

El peor escenario mostró una evaluación de las zonas no mezcladas como regiones mezcladas. La sobrevaloración del nivel de homogeneidad sucedió para el canal verde y el canal rojo al evaluarlos por separado. En el caso de ambos canales en su conjunto se obtuvo un mejor resultado. Esta última evaluación resultó similar a la obtenida con el método propuesto en este trabajo, aunque con una ligera sobrestimación del nivel del mezclado en el método RGB.

En las tablas 4.1 a 4.6 se presentan los resultados para todas las configuraciones de impulsores estudiados en este proyecto, la evolución de la homogeneidad durante el proceso y el tiempo de mezclado. Debido a la complejidad que implica mostrar todas las imágenes, los resultados se presentan en la figura 4.7, en la cual se muestra la evolución de la homogeneidad con respecto al tiempo para todos los escenarios de agitadores estudiados.

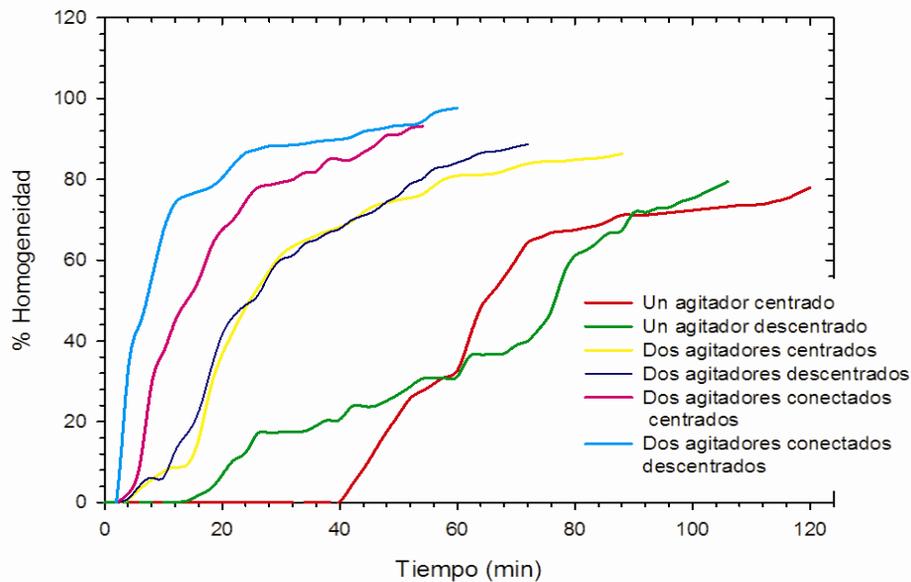


Figura 4.7. Evolución de la homogeneidad en el proceso de mezclado con los diferentes arreglos de turbinas estudiados

A partir de esta figura se puede obtener información relevante, entre los datos más importantes aportados se encuentran:

- a) Las turbinas descentradas alcanzan un mayor nivel de homogeneidad en el tanque de mezclado con respecto a la misma configuración centrada, lo cual concuerda con los resultados reportados por Alvarez *et al*, 2002; Ascanio *et al*, 2002; Karcz *et al*, 2005; Montante *et al*, 2006; Arriata *et al*, 2006.
- b) En el caso de dos turbinas Rushton unidas por las dos pequeñas placas, el nivel de homogeneidad se incrementa hasta niveles no alcanzados por las otras configuraciones en un menor tiempo de mezclado.
- c) Este arreglo de agitador alcanza en ambas posiciones centrada y descentrada el nivel de homogeneidad mínimo establecido como deseable (90%).

4.3 Consumo de potencia y energía

El consumo de potencia se determinó midiendo el par de torsión con la ayuda de un torquímetro colocado en el brazo del agitador mostrado en la figura 3.1. A partir del valor del par, se calcula el consumo de potencia de acuerdo a la ecuación (7)

$$P = 2\pi N\tau \dots\dots\dots (7)$$

donde:

N Velocidad del impulsor (rev/s)

τ Par (N·m)

Al dividir este valor obtenido entre el volumen de fluido total en el tanque (V), se obtiene la potencia específica, de acuerdo a la ecuación (8)

$$P_E = 2\pi N\tau/V \dots\dots\dots (8)$$

El cálculo del consumo de energía para cada impulsor estudiado se calculó a partir de la ecuación (9)

$$E = \int_0^t 2\pi N\tau dt \dots\dots\dots (9)$$

donde t es el tiempo de mezclado; en este caso es el tiempo necesario para obtener un nivel de homogeneidad de 90%.

A partir de estas formulas se calculó la potencia que consume el agitador, la potencia específica y el consumo de energía necesario para mezclar un lote de producto con los impulsores estudiados. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Consumo de energía en el proceso de mezclado

Configuración del impulsor	% de homogeneidad	Potencia (W)	Potencia específica (W/m ³)	Tiempo de mezclado (s)	Consumo de energía específica (kJ/m ³)
1 turbina Rushton centrada	71	0.0377	10.69	7200	77.0
1 turbina Rushton descentrada	73	0.04084	11.58	6600	76.43
2 turbinas Rushton centradas	78	0.05655	16.03	4800	76.9
2 Turbinas Rushton descentradas	90	0.05969	16.92	4480	75.8
2 turbinas Rushton unidas centradas	90	0.06912	19.59	2800	54.8
2 turbinas Rushton unidas descentradas	90	0.0754	21.37	2040	43.6

En la tabla 4.7 se observa que el menor valor de consumo de potencia corresponde al agitador compuesto por una turbina Rushton centrada y a su vez con esta configuración se obtiene el menor nivel de homogeneidad, el cual corresponde a un valor de 71%. El consumo total de energía es otro aspecto importante y en el caso de una turbina Rushton se alcanza un valor de 76.97 kJ/m³ para un tiempo de mezclado de 7200 segundos. Al fijar este valor como la

máxima cantidad de energía a consumir en los diferentes arreglos de agitadores, se obtiene el total de los resultados presentados en la tabla 4.7. A partir de estos resultados se determina que el sistema compuesto por dos turbinas Rushton unidas con dos pequeñas placas de acero es el sistema más eficiente de todos los arreglos estudiados debido principalmente al menor consumo de energía, menor tiempo de mezclado y mayor nivel de homogeneidad alcanzado por este arreglo de agitador dentro del tanque de mezclado. A su vez, este arreglo se vuelve más eficiente al desplazar el impulsor radialmente del eje de simetría del tanque de mezclado ($X^* = 0.3$). Con este arreglo se disminuye en un 43 % el consumo de energía y en un 73 % el tiempo de mezclado al compararse con el escenario más ineficiente que corresponde a la turbina Rushton centrada.

Al analizar los resultados obtenidos hasta este momento, surgen algunas interrogantes: ¿El aumento en el nivel de homogeneidad es debido a un incremento en la circulación del fluido en el interior del tanque?, ¿la distribución de la velocidad del fluido se mantiene constante o se incrementa con el arreglo de impulsor propuesto?, ¿se incrementa la capacidad de bombeo del agitador?, ¿la disminución en el tiempo de mezclado es el resultado del aumento de capacidad de bombeo, circulación, incremento en la velocidad o una combinación de todas?

Con la finalidad de entender mejor este proceso y dar respuesta a las interrogantes surgidas en el mejoramiento del proceso de mezclado, se llevó a cabo un análisis cuantitativo con el equipo de PIV. En este análisis se determinan patrones de flujo, gasto volumétrico y capacidad de bombeo del agitador en el tanque de mezclado, así como también la distribución de velocidad del fluido y su vorticidad en el interior del tanque de agitación.

4.4 Campos de flujo

Los campos de flujo se determinaron a partir de la técnica de velocimetría de partículas (PIV), un método experimental utilizado en fluidos transparentes. La finalidad fue encontrar la causa de la mejora en el proceso de mezclado al incorporar las dos pequeñas placas entre las turbinas Rushton.

4.4.1 Mapas de velocidad y líneas de corriente

Los patrones de flujo en el interior del tanque de mezclado son una herramienta útil, la cual proporciona información sobre el flujo generado por los diferentes arreglos de impulsores estudiados en posición centrada y descentrada. Los patrones de flujo en 2D ofrecen visualización en un plano siendo posible observar los campos de flujo generados por cada una de las paletas de los diversos agitadores en estudio. Las imágenes de los patrones de flujo encontrados se presentan en dos formas: el caso centrado y el caso descentrado. En el primer caso se muestra únicamente la mitad del tanque de mezclado debido a la simetría del sistema y en el caso descentrado se muestra una imagen con ambas partes del tanque. En este último caso, es necesario tomar imágenes en ambos lados del tanque y posteriormente reconstruir los campos de flujo en ambos lados del agitador. El resultado obtenido para los diversos agitadores se presenta en las figuras 4.8 a 4.10.

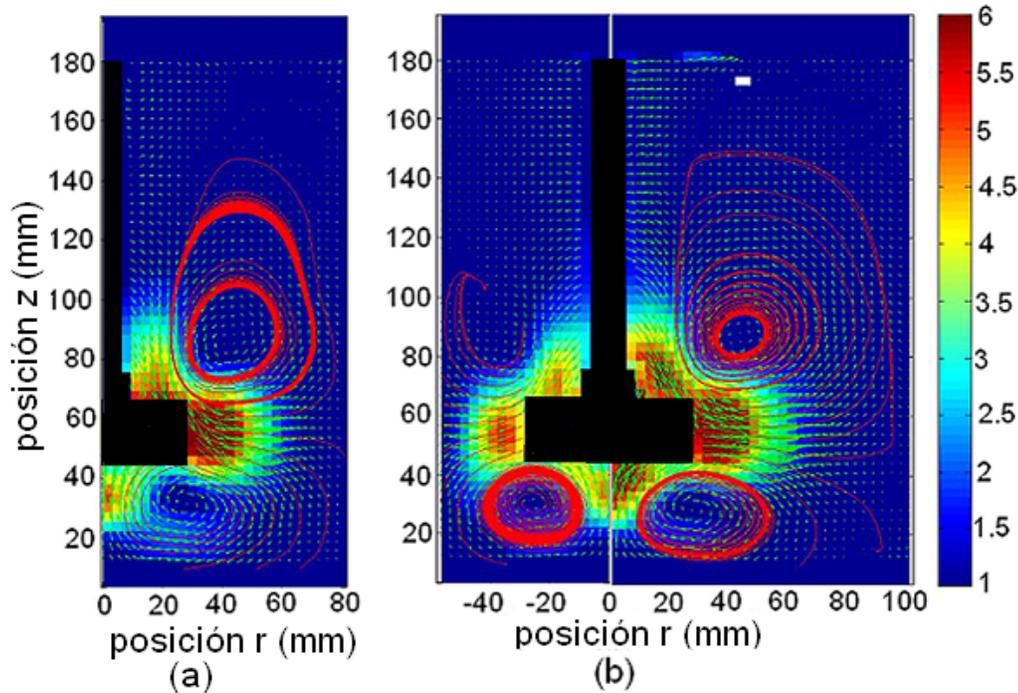


Figura 4.8. Campos de velocidad y líneas de corriente en una turbina Rushton, a) centrada y b) descentrada (escala en la barra en mm/s).

En la figura 4.8 se observa el campo de velocidades generado por una turbina Rushton, donde la máxima velocidad se localiza alrededor del agitador y las velocidades más bajas se detectan en las regiones más alejadas a él; incluso se observan algunas regiones estancadas en las cuales la velocidad es cercana a cero. En la misma imagen se presentan las líneas de corriente, las cuales son unas familias de curvas tangentes al vector velocidad del flujo. Estas cambian cuando el flujo cambia con el tiempo, esto es cuando el flujo no es estacionario. La finalidad de calcularlas es determinar la trayectoria que sigue el fluido en un instante dado. Al calcular las líneas de corriente es posible observar la trayectoria del fluido, desde la punta de la paleta del agitador y conocer el recorrido que tiene en el interior del tanque de mezclado. Estas líneas ponen de manifiesto la formación de las pseudo-cavernas en la parte superior e inferior del agitador, las cuales son formadas por la baja velocidad del agitador al operar en régimen laminar y la alta viscosidad del fluido (Lamberto *et al*, 1996; Yao *et al*, 1998). La combinación de estas dos variables genera una velocidad máxima de hasta 6

mm/s. En la figura 4.8 se observa que el diferencial de presión generado por el paso de la paleta del agitador provoca una succión de fluido hacia el interior del impulsor, reduciendo el avance del fluido hacia las paredes del tanque de mezclado.

La evidencia encontrada con el método de PIV y el fenómeno causado por la repetición del proceso de bombeo del agitador, debido a su simetría en cada paleta de la turbina, ponen de manifiesto la forma en la cual se generan las estructuras toroidales (pseudocavernas), en la parte superior e inferior del agitador. El cálculo de las líneas de corriente revela una gran distancia de recorrido por parte del fluido, lo cual se traduce en un tiempo de circulación muy grande.

En la figura 4.9, se presenta el estudio para el agitador compuesto por dos turbinas Rushton coaxiales, donde se observan fenómenos similares a los encontrados para el caso de una sola turbina Rushton. Una reducción de las zonas con fluido a baja velocidad, causado por la incorporación de la segunda turbina. La velocidad máxima del fluido en este caso se reduce en un 33 % al pasar de 6 mm/s para una sola turbina Rushton a 4 mm/s en el caso de las dos turbinas Rushton coaxiales, lo que se traduce en un movimiento más lento del fluido en el interior de las pseudo-cavernas. Esta reducción en la velocidad se explica en parte por el diferencial de presión generado en ambas turbinas, el cual se reduce en la turbina inferior al existir otro diferencial en la turbina superior. Este efecto genera a media altura del tanque un diferencial de presión en direcciones contrarias en el eje z, causado por la interacción de las turbinas, ayuda a la disminución del tamaño de las pseudo-cavernas entre ambas turbinas.

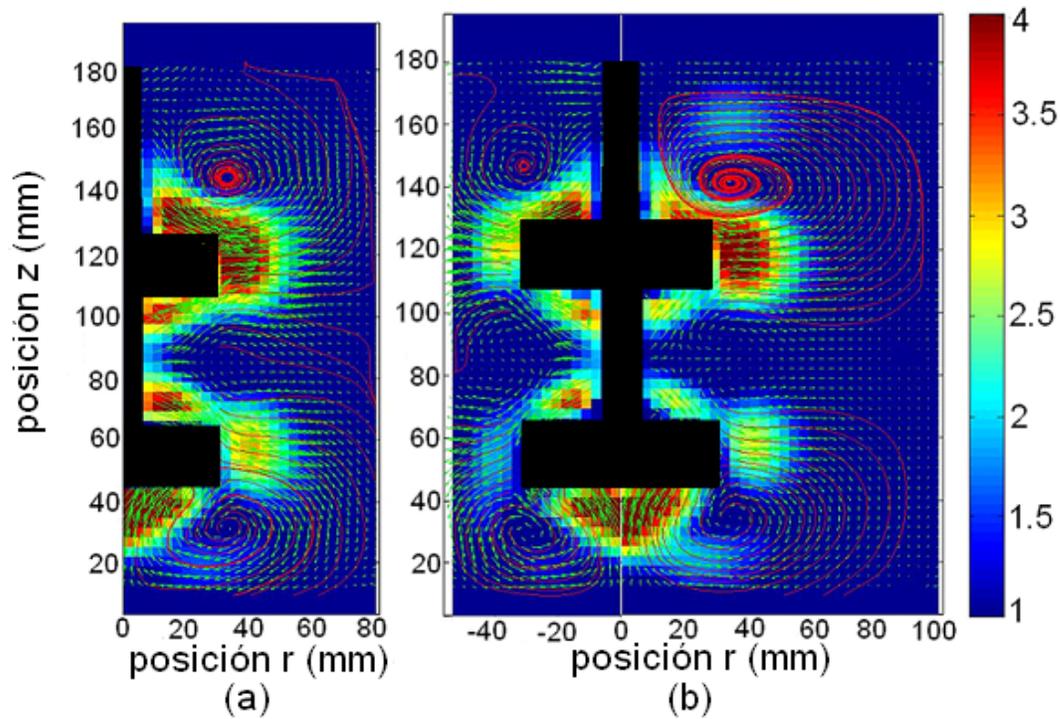
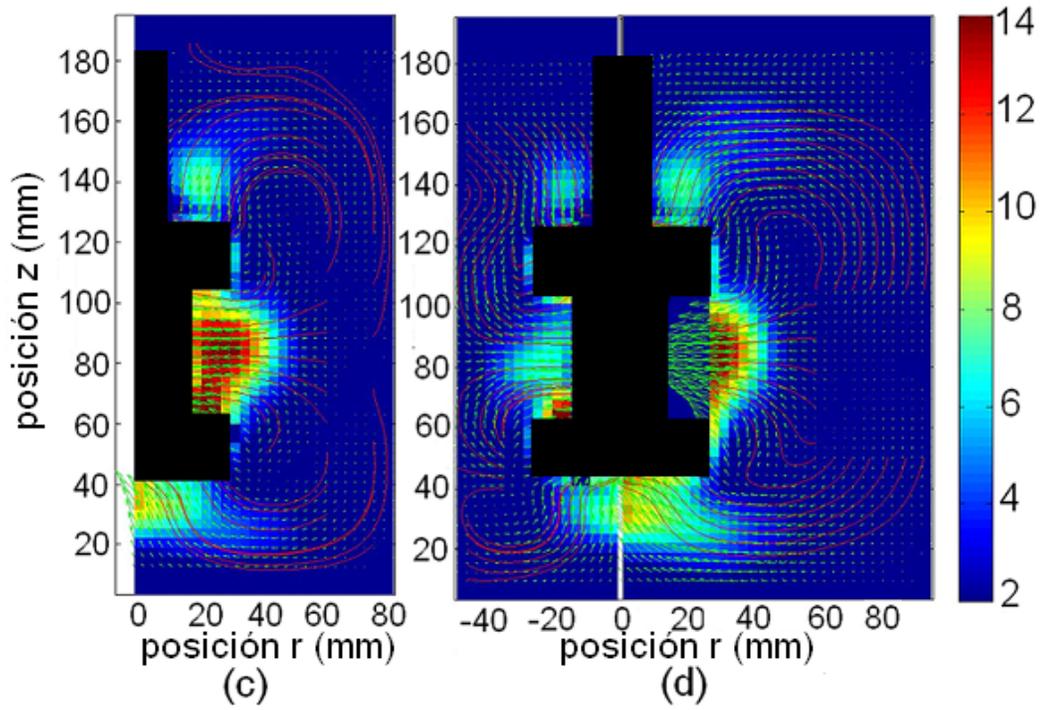
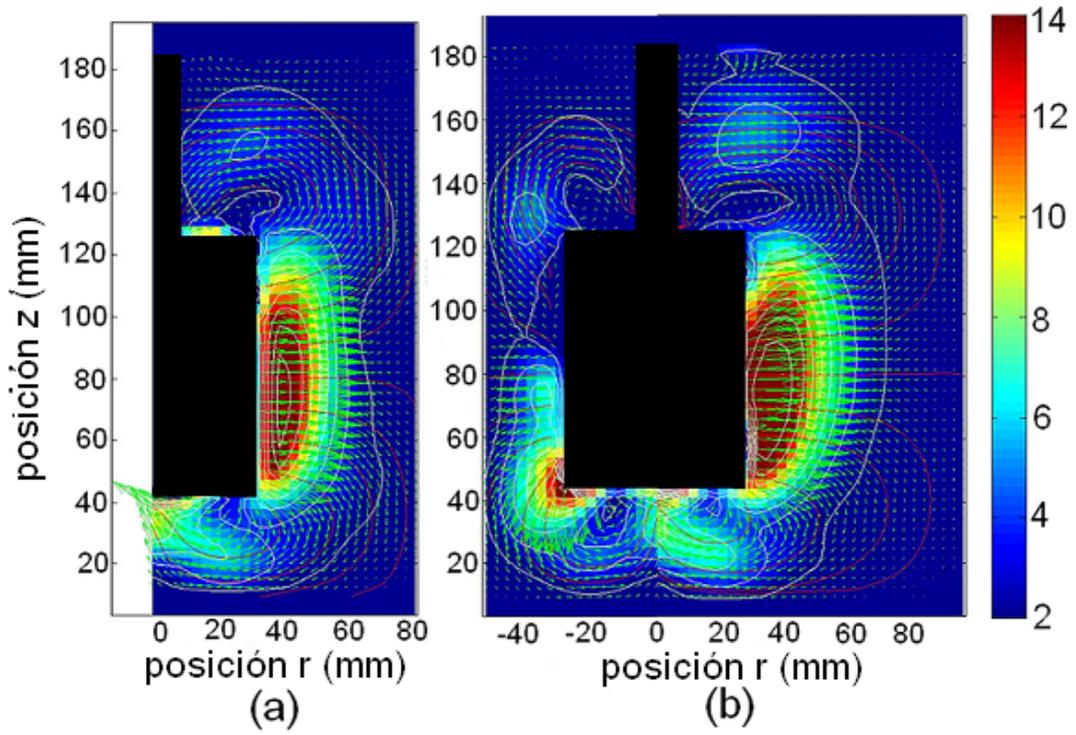


Figura 4.9. Campos de velocidad y líneas de corriente en dos turbinas Rushton, a) centrada y b) descentrada (escala en la barra en mm/s).

El último arreglo de agitador estudiado se presenta en la figura 4.10, en la cual se muestran imágenes en tres diferentes posiciones angulares para los casos centrado y descentrado (0 para a, b, 60 para c, d y 120 grados para e, f respectivamente), descritas previamente en la figura 3.6 del capítulo Metodología y Desarrollo Experimental.



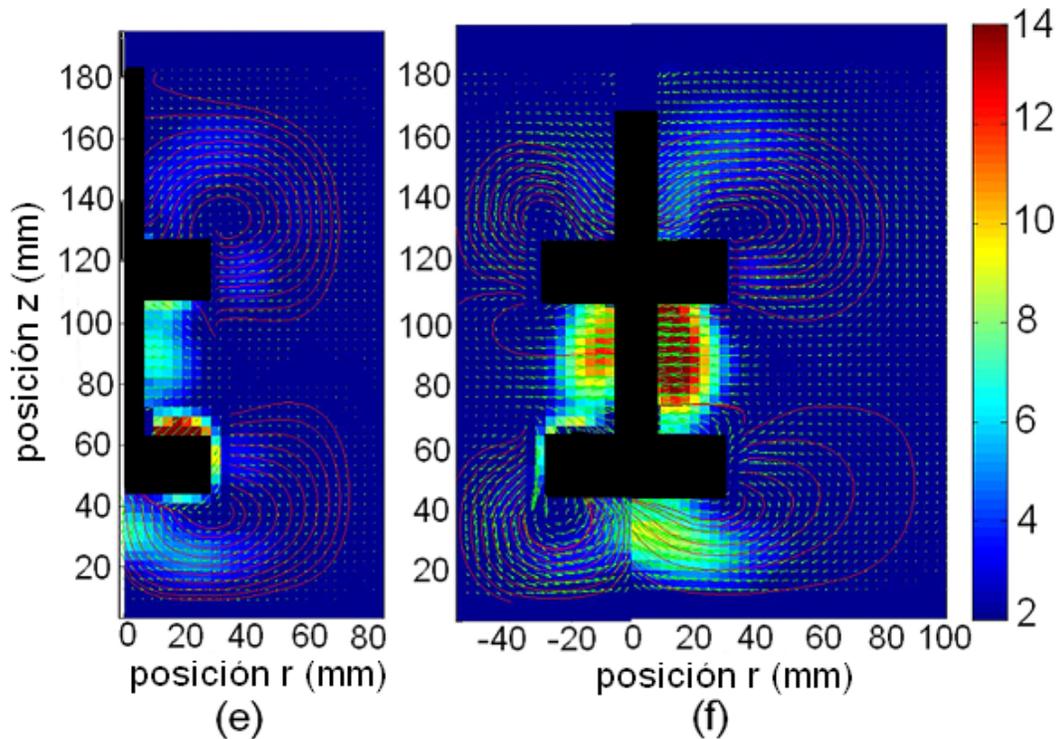


Figura 4.10 Campos de velocidad y líneas de corriente en dos turbinas Rushton unidas: a) Centrada a 0 grados; b) Descentrada a 0 grados; c) Centrada a 60 grados; d) Descentrada a 60 grados; e) Centrada a 120 grados; f) Descentrada a 120 grados. (escala en la barra en mm/s).

En la figura 4.10 se observa movimiento de fluido en prácticamente todas las zonas del tanque de mezclado, lo cual provoca una reducción en el tiempo de mezclado. En este arreglo de agitador se alcanza una velocidad máxima de 14 mm/s, cuyo valor es 2.3 veces mayor a la velocidad que se tiene en el arreglo de una sola turbina Rushton y 3.5 veces mayor al arreglo con dos turbinas Rushton coaxiales. Este valor de velocidad máxima se alcanza en el centro del agitador, en una zona donde la velocidad para los arreglos de una y dos turbinas Rushton es baja. Las líneas de corriente nos revelan que la ruta del fluido sale desde las paletas del agitador hacia la pared del tanque. En la figura 4.10 a y b la dirección del flujo en la zona central del tanque es hacia la pared del tanque y en la parte superior e inferior se observa la recirculación hacia el agitador generando la aparición de un vórtice en el tanque agitado.

En la siguiente posición del agitador (figura 4.10 c, d), se observa que el diferencial de presión generado en el interior del tanque, por el desplazamiento de la paleta que le antecede a esta, tiende a ser llenado por nuevo fluido entrando hacia el interior del impulsor y proveniente de las inmediaciones de la pared en la parte central del tanque agitado. A su vez, el fluido desplazado hacia la superficie y el fondo del tanque regresa en forma de vórtice hacia el interior del agitador. Para la última posición del agitador (120 grados), la mayor velocidad sigue estando en el centro del tanque, lo que se traduce en una mayor circulación del flujo pasando por el impulsor.

Los mapas de velocidad del flujo en los casos descentrados en todas las configuraciones estudiadas revelan el motivo de la inclinación de los toroides. Esta se debe a la cercanía de la paleta con la pared del tanque, en estos casos el fluido golpea con fuerza sobre la pared del tanque y provoca un desplazamiento del fluido en dirección axial hacia la superficie y el fondo del tanque al no poder seguir su camino en forma radial. Esta fuerza genera que el toroide se incline hacia la superficie del líquido en la parte superior de la paleta y hacia el fondo del tanque en la parte inferior (fenómeno previamente descrito en los experimentos realizados de colorimetría). Aumentando la recirculación en el tanque y mejorando así el mezclado.

4.4.2 Mapas de vorticidad

La vorticidad del fluido en el interior del tanque de mezclado se puede calcular a partir de los resultados obtenidos con la técnica de PIV. Matemáticamente, la vorticidad se define como el rotacional de la velocidad y se representa mediante la ecuación (10).

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v} \dots\dots\dots (10)$$

La presencia de vorticidad en un flujo indica la rotación de las partículas del fluido. En sistemas de mezclado en un plano z, r la ecuación de la vorticidad se define como:

$$\omega = \frac{\partial U_z}{\partial r} - \frac{\partial U_r}{\partial z} \dots\dots\dots (11)$$

Con la ecuación (11) se puede calcular la vorticidad generada en cada valor de velocidad obtenida con el método de PIV. La vorticidad tiene valores negativos cuando el vórtice gira en el sentido de las manecillas del reloj y valores positivos cuando la dirección del giro es en el sentido inverso. En sistemas con coordenadas cilíndricas, la vorticidad genera una resultante en la dirección acimutal (dirección θ) al plano estudiado. Con los valores de vorticidad obtenidos, se construyen los mapas de vorticidad al realizar el post-procesamiento de los resultados obtenidos.

En las figuras 4.11 y 4.12 se observan un movimiento en forma de espiral cuya tendencia es girar alrededor de un centro, generando vórtices coherentes, llamados pseudo-cavernas. Los valores de máxima vorticidad se localizan en la vecindad de los agitadores. Los valores de la vorticidad calculados son mayores para el caso de una sola turbina Rushton que en dos turbinas Rushton, resultado similar al encontrado para los vectores de velocidad del fluido en el interior del tanque. El valor es 1.6 veces mayor en una turbina Rushton que al implementar dos turbinas Rushton coaxiales, presumiblemente debido al diferencial de presión que se genera en ambas turbinas, lo que divide el flujo en la parte media del tanque en ambas direcciones ($z+$, $z-$).

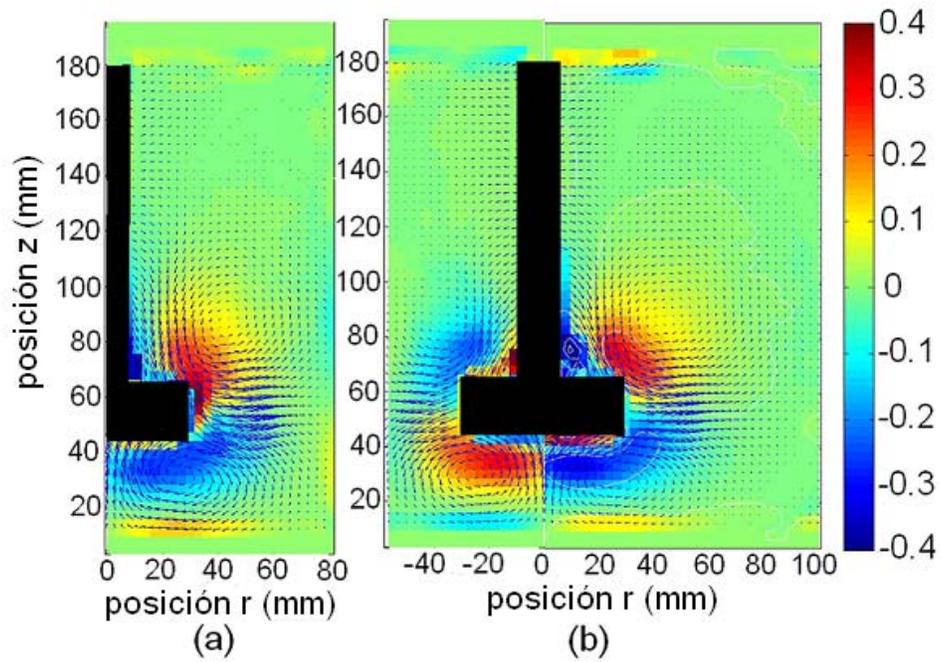


Figura 4.11. Mapas de vorticidad generados por una turbina Rushton, a) centrada y b) descentrada (escala en la barra en s^{-1})

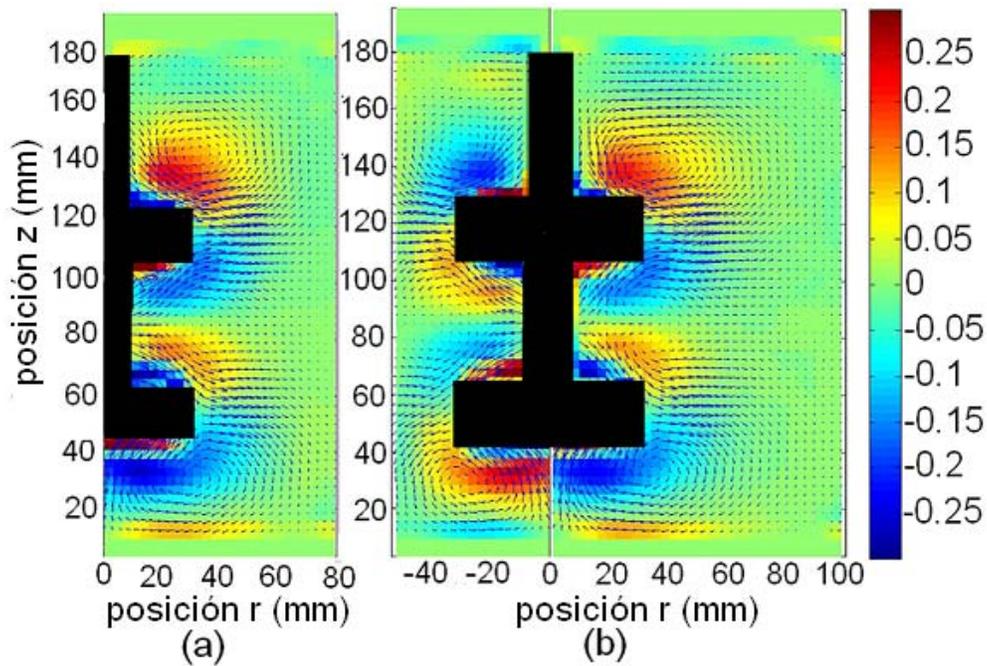
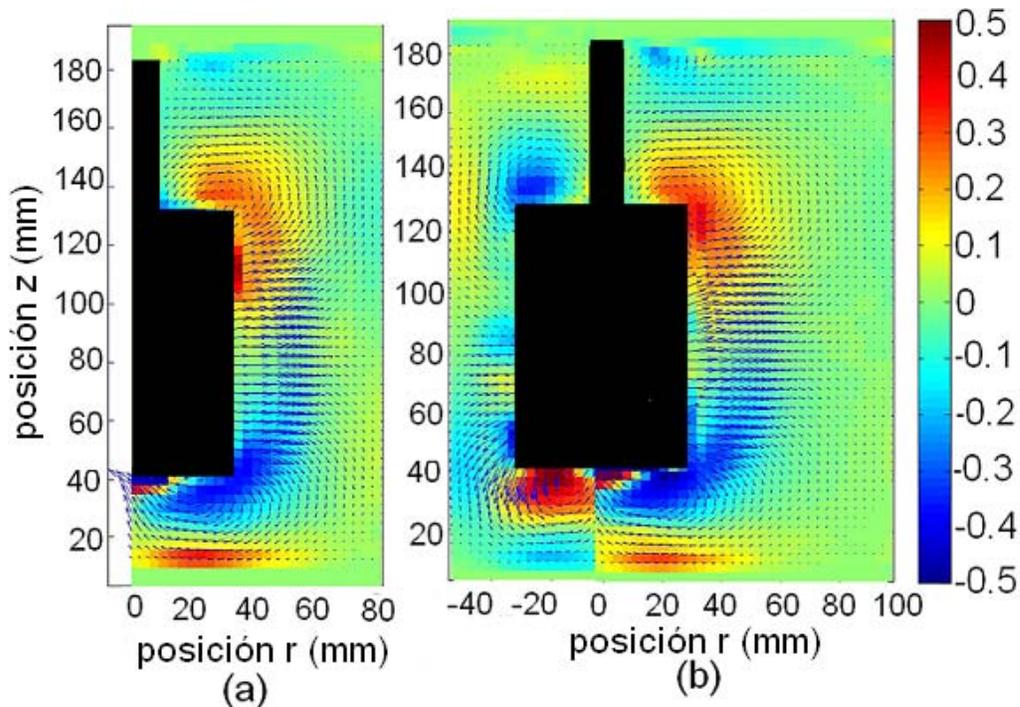


Figura 4.12. Mapas de vorticidad generados por dos turbinas Rushton, a) centradas y b) descentradas (escala en la barra en s^{-1})

En las zonas alejadas del agitador, la magnitud de la vorticidad tiene valores pequeños, lo cual coincide con las zonas segregadas de baja velocidad o casi estáticas de menor mezclado.

En los arreglos con el agitador descentrado, se observa que los vórtices generados se inclinan en ambos lados de la turbina pero a diferente altura del tanque. Este fenómeno se describió anteriormente en los resultados obtenidos con el método de colorimetría. Sin embargo, en este caso es posible determinar la distancia del centro del vórtice a la punta de la paleta del agitador. Con este estudio se puede establecer la asimetría de los vórtices generados por el descentramiento de la turbina en el tanque de mezclado. El último arreglo estudiado (turbinas Rushton unidas mediante dos placas de acero) se presenta en la figura 4.13.



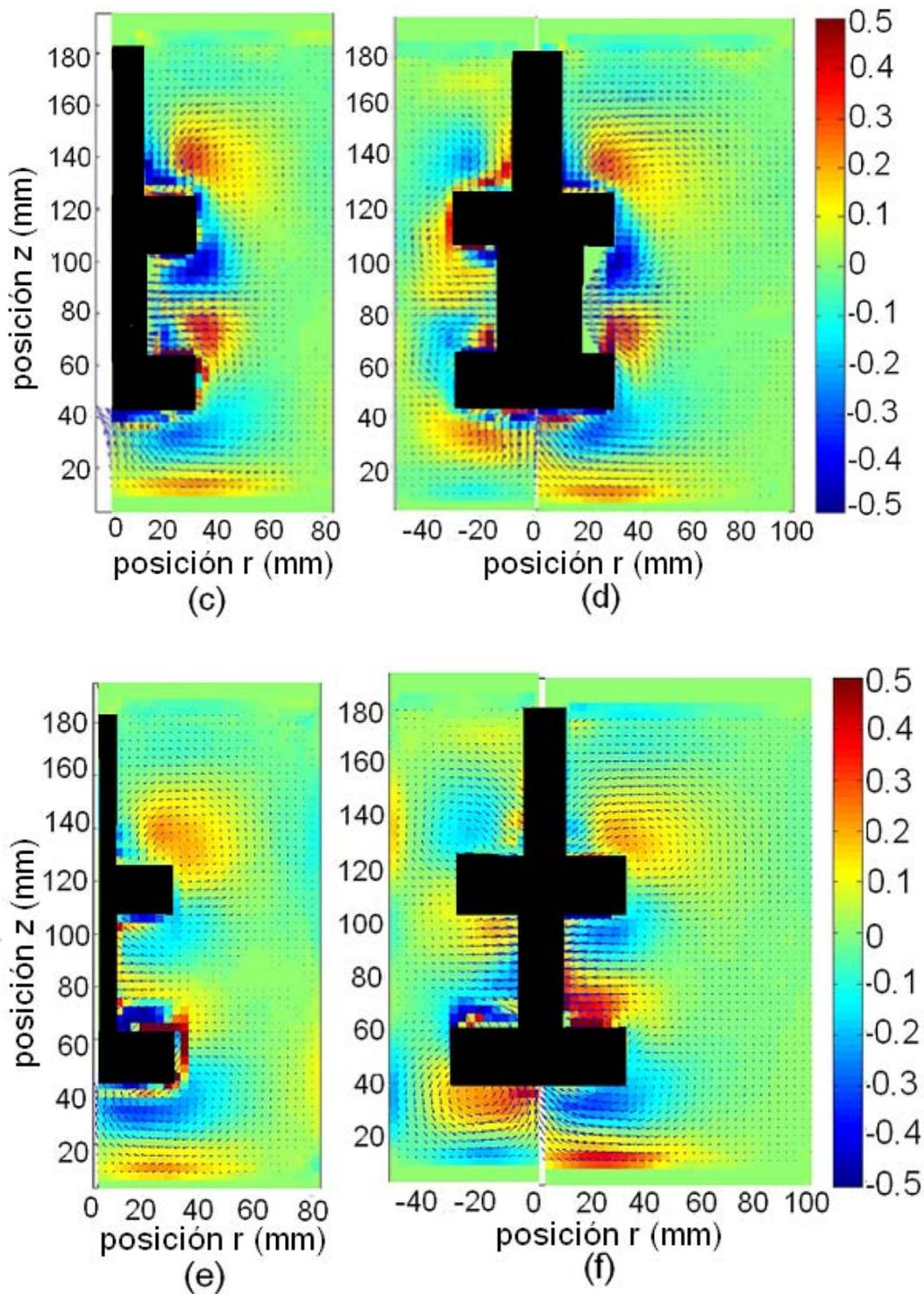


Figura 4.13 Mapas de vorticidad generados por dos turbinas Rushton unidas por dos placas de acero: a) Centrada a 0 grados; b) Descentrada a 0 grados; c) Centrada a 60 grados; d) Descentrada a 60 grados; e) Centrada a 120 grados; f) Descentrada a 120 grados. (escala en la barra en s^{-1})

En la figura 4.13 se muestran los campos de vorticidad a diferentes posiciones angulares que se obtienen al estudiar la geometría de agitador compuesta por dos turbinas Rushton unidas mediante dos pequeñas placas de acero en cada paleta del agitador. Con base en estas imágenes se presume la presencia de una fuerza de elongación y otra de contracción, las cuales actúan directamente sobre la estructura del toroide, modificando de manera constante su forma y posición. La presencia de ambas fuerzas induce la destrucción de los toroides presentes en el tanque de mezclado, fenómeno revelado por la diferente posición y tamaño que presentan los toroides en cada una de las imágenes para los diferentes ángulos estudiados. Este movimiento de posición del centro del vórtice, causado por el agitador al someter al fluido a esfuerzos de deformación constante actuando sobre la estructura del toroide en la dirección z, genera la aparición de condiciones de inestabilidad favorables para la destrucción de las estructuras toroidales generadas a bajos números de *Re*.

4.4.3 Capacidad de bombeo y Gasto volumétrico

Aplicando la técnica de PIV, se puede calcular el gasto volumétrico para cada arreglo de agitador. En este caso, se inició con el cálculo de la capacidad de bombeo del agitador (Q_c), la cual se define como la cantidad de flujo promedio que sale de la turbina. Para la dirección axial la capacidad de bombeo puede ser expresada mediante la ecuación (12):

$$Q_c = \int_0^{r_0} 2\pi r \langle V_z \rangle_{z2} dr + \int_0^{r_0} 2\pi r \langle V_z \rangle_{z1} dr \dots\dots\dots (12)$$

y en dirección radial puede ser calculada por la ecuación (13):

$$Q_c = \int_{z1}^{z2} \pi D \langle Vr \rangle_{r=D/2} dz \dots\dots\dots (13)$$

donde $\langle V_z \rangle$ es el componente de la velocidad promedio del fluido en dirección perpendicular al área que atraviesa. La velocidad $\langle V_z \rangle$ en todos los casos es la

velocidad de un promedio de 3000 imágenes tomadas con un intervalo de 480 ms cada una, cuya finalidad es asegurar un promedio estadístico confiable. Este cálculo se realizó para los arreglos de agitador centrados y descentrados. En los casos descentrados los experimentos fueron realizados en ambos lados del agitador; entre el punto más cercano de la pared del tanque de mezclado al centro del agitador y entre el punto más lejano de la pared del tanque al centro del agitador. El resultado reportado es el promedio de ambas mediciones. El flujo del agitador se calculó mediante la sumatoria aplicada a un área cilíndrica ocupada por el agitador de acuerdo a la siguiente ecuación

$$Q_c = \sum_i^n V_i A_i \dots\dots\dots (14)$$

donde V_i es la velocidad en el punto i del mapa de vectores de velocidad.

El número de bombeo, definido como un número adimensional de acuerdo a la ecuación (15)

$$NQ_c = \frac{Q_c}{ND^3} \dots\dots\dots (15)$$

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Números de bombeo en los diferentes arreglos de agitadores

Agitador	Configuración	Número de Bombeo NQ_c
Una turbina Rushton	Centrada	0.11
	Descentrada	0.21
Dos turbinas Rushton coaxiales	Centrada	0.28
	Descentrada	0.29
Dos turbinas Rushton conectadas mediante 2 placas	Centrada	0.35
	Descentrada	0.36

El resultado obtenido para una turbina Rushton centrada concuerda con lo reportado por Rice *et al*, 2006 y por Xuereb *et al*, 2006 para el caso de una turbina Rushton en régimen laminar. El número de bombeo no ha sido reportado en situaciones con el agitador excéntrico. En el caso de dos turbinas Rushton coaxiales, se ha reportado el número de bombeo para flujo turbulento con un valor promedio de 0.89 (Wu y Patterson, 1989; Zadghaffari *et al*, 2009) y para una turbina Rushton en régimen turbulento este valor oscila entre 0.4 y 0.5. Estos valores son varias veces el valor obtenido en régimen laminar, situación semejante a la que se tiene con dos turbinas Rushton centradas.

En el caso del arreglo de agitador compuesto por las dos turbinas Rushton unidas mediante las dos placas de acero, el NQ_c obtenido indica una mejora en la circulación del flujo en el interior del tanque, lo cual se asocia directamente con un incremento en la eficiencia en el proceso de mezclado, que concuerda con los resultados experimentales realizados con colorimetría.

Para los arreglos de agitadores con dos turbinas Rushton coaxiales y dos turbinas Rushton coaxiales unidas por dos placas de acero, el valor del número de bombeo permanece prácticamente invariable en los casos centrados y descentrados. Una de las posibles razones asociadas a este resultado, podrían ser las interacciones de flujo generadas entre ambas turbinas, lo que generaría el incremento en el número de bombeo en más del 100 % con respecto a una sola turbina Rushton y este aumento no estaría directamente relacionado al descentramiento del arreglo coaxial. Este resultado explica en parte el aumento en el grado de homogeneidad de estos agitadores. A su vez los resultados muestran una capacidad de bombeo muy similar entre una turbina Rushton centrada y dos turbinas Rushton coaxiales, con una diferencia significativamente menor en consumo de potencia para el caso de una sola turbina Rushton descentrada.

De la misma forma, se realizó el cálculo del flujo máximo desplazado por el agitador. En este caso la toma de las fotografías se realizó en la punta de las paletas del impulsor. Este procedimiento se llevó a cabo para todos los arreglos de agitadores, tomando un par de fotografías por cada giro completo del impulsor.

Utilizando esta técnica se puede calcular el gasto volumétrico máximo desplazado por la punta del impulsor. Inicialmente se realiza el balance de flujo para la punta de la paleta del agitador. El balance se representa de acuerdo a la ecuación (16).

$$Q_{en} = Q_{sal} \dots\dots\dots (16)$$

donde Q_{en} es el flujo entrando al agitador y Q_{sal} es el flujo saliendo del agitador

Para ilustrar el significado de la ecuación 1, tomamos la figura 4.14 como ejemplo. En la figura 5.14 las variables Q_2 y Q_3 representan el volumen de flujo entrando al agitador y Q_1 representa el volumen de flujo saliendo del agitador. Sustituyendo Q_1 , Q_2 y Q_3 en la ecuación (17), obtenemos:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \dots\dots\dots (17)$$

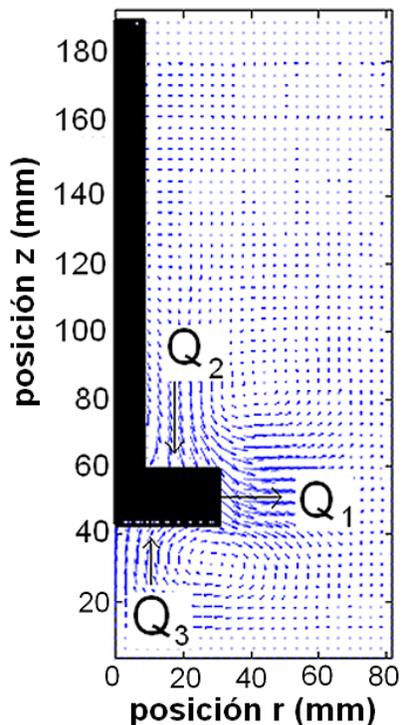


Figura 4.14. Mapa de vectores generado por una turbina Rushton

donde Q está definida como:

$$Q = \int V dA \dots\dots\dots (18)$$

El gasto volumétrico se calcula integrando la velocidad del flujo en el área transversal que atraviesa el fluido. Los valores determinados experimentalmente en el equipo de PIV son puntuales, por lo cual la ecuación a resolver se transforma en una integral discreta. La ecuación (18) se transforma por lo tanto en la ecuación (19), utilizada en el cálculo de NQ_c .

$$Q = \sum_{i=1}^n V_i A_i \dots\dots\dots (19)$$

donde V_i es la velocidad adquirida por el fluido entre la frontera de la paleta del agitador y el líquido. En todos los casos el área que atraviesa el fluido y la dirección del mismo son perpendiculares.

Ahora bien, si consideramos que el agitador está constituido por 6 paletas iguales en su estructura, la ecuación (19) puede ser escrita como:

$$Q = 6 \sum_{i=1}^n V_i A_i \dots\dots\dots (20)$$

La ecuación (20) se aplica en los arreglos de agitadores con una turbina Rushton y dos turbinas Rushton coaxiales, en ambos casos con el agitador en posición centrada y descentrada. En el caso del agitador conformado por dos turbinas Rushton unidas por las dos pequeñas placas de acero colocadas a 180 grados, la ecuación (20) se transforma en

$$Q = 2 \sum_{i=1}^n V_i A_i \dots\dots\dots (21)$$

Esta ecuación se aplica 3 veces, una por cada posición descrita en la figura 3.6. Los resultados se presentan en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Balance de flujo volumétrico para las distintas configuraciones de agitadores estudiadas

Configuración	Flujo de entrada (mm ³ /s)	Flujo de salida (mm ³ /s)	Diferencia (mm ³ /s)	% Error relativo
1 Turbina Rushton centrada	1160	1134	26	2.25
1 Turbina Rushton descentrada	1097	1114	17	1.53
2 Turbinas Rushton centradas	1476	1510	44	2.25
2 Turbinas Rushton descentradas	1448	1471	23	1.56
2 Turbinas Rushton coaxiales conectadas por 2 placas delgadas	2391	2377	14	0.59
2 Turbinas Rushton coaxiales y descentradas conectadas por 2 placas delgadas	2545	2482	63	2.54

A partir de los resultados reportados en la tabla 4.9, se observa que entre el flujo volumétrico y el consumo de potencia no se conserva la misma relación de aumento en su magnitud, es decir no se incrementa en la misma proporción al valor de la potencia consumida por el agitador y el flujo de líquido que desplaza. En el caso de dos turbinas Rushton se obtiene un incremento del 50% en la potencia y un 30 % en el flujo volumétrico de fluido desplazado, al compararse con los resultados obtenidos para el caso de una sola turbina Rushton. En el caso de las dos turbinas Rushton unidas por dos placas de acero se obtiene un incremento del 100 % en el consumo de potencia y un 110 % en el flujo volumétrico al compararse con el caso de una sola turbina Rushton (ver tabla 4.7).

4.4.4 Velocidad vertical

El objetivo de analizar los campos de la velocidad vertical es comparar la capacidad de movimiento de fluido en dirección axial con los diferentes escenarios de impulsores estudiados. En este caso se definen inicialmente dos variables adimensionales

$$V^* = \frac{V_{fluido}}{V_{periférica}} \dots\dots\dots (22)$$

donde V_{fluido} es la velocidad instantánea en dirección vertical que presenta el fluido en función de su posición en el tanque de mezclado y $V_{periférica}$ es la velocidad del agitador en la punta de la paleta. La segunda variable adimensional está definida como:

$$R^* = \frac{r_{fluido}}{r} \dots\dots\dots (23)$$

donde r_{fluido} es la posición radial medida desde el centro del agitador hasta la ubicación del punto medido en el tanque, y r es el radio del agitador. Las figuras 4.15 a 4.16 presentan los diferentes perfiles de la velocidad vertical en función de la posición radial en diferentes alturas para los escenarios y arreglos de impulsores investigados.

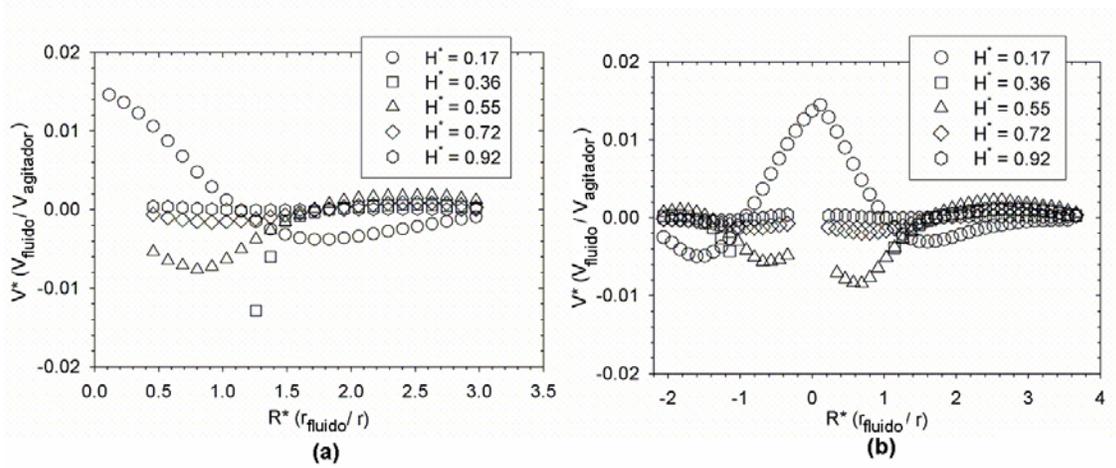


Figura 4.15. Velocidad vertical de una turbina Rushton: a) centrado y b) descentrado

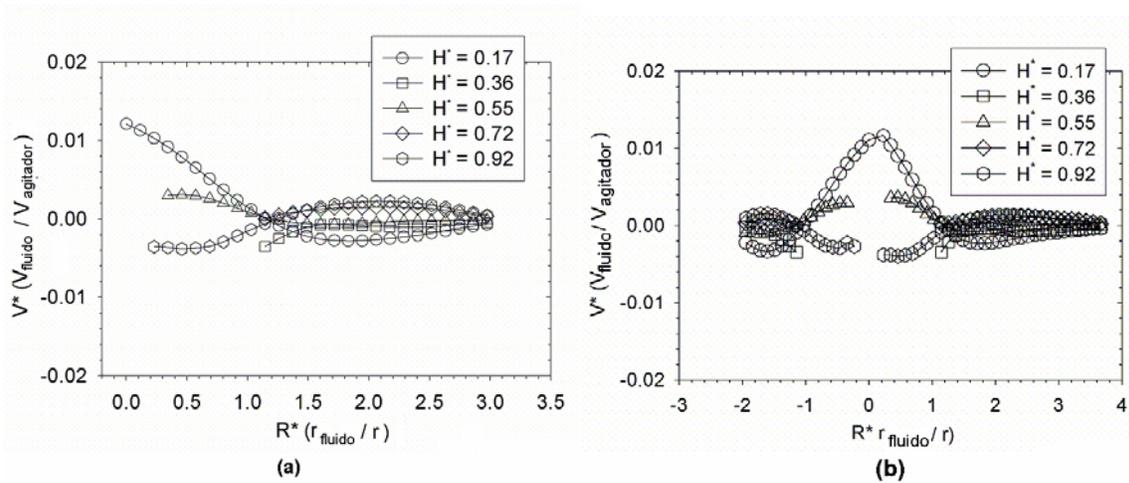
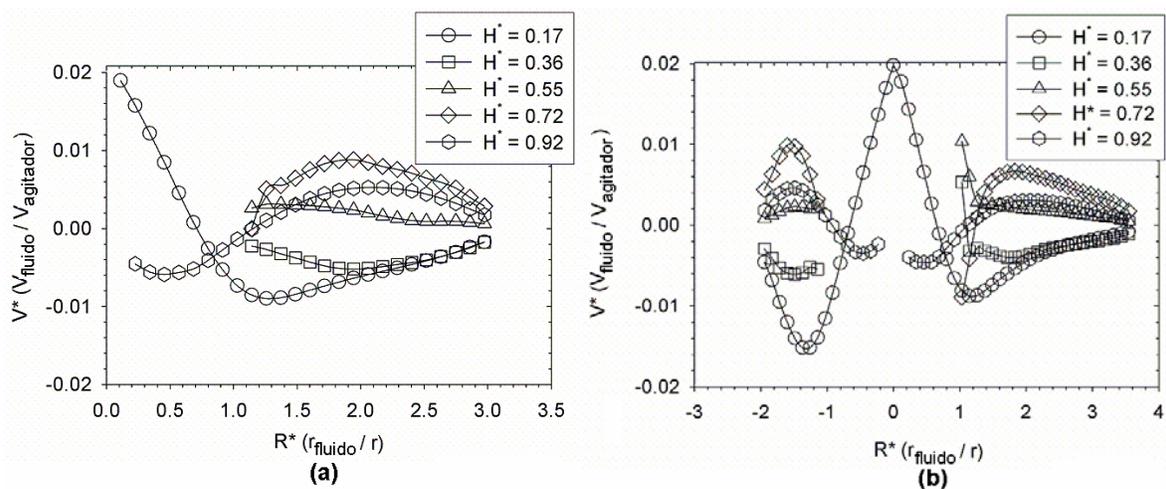


Figura 4.16. Velocidad vertical de dos turbinas Rushton: a) centradas y b) descentradas



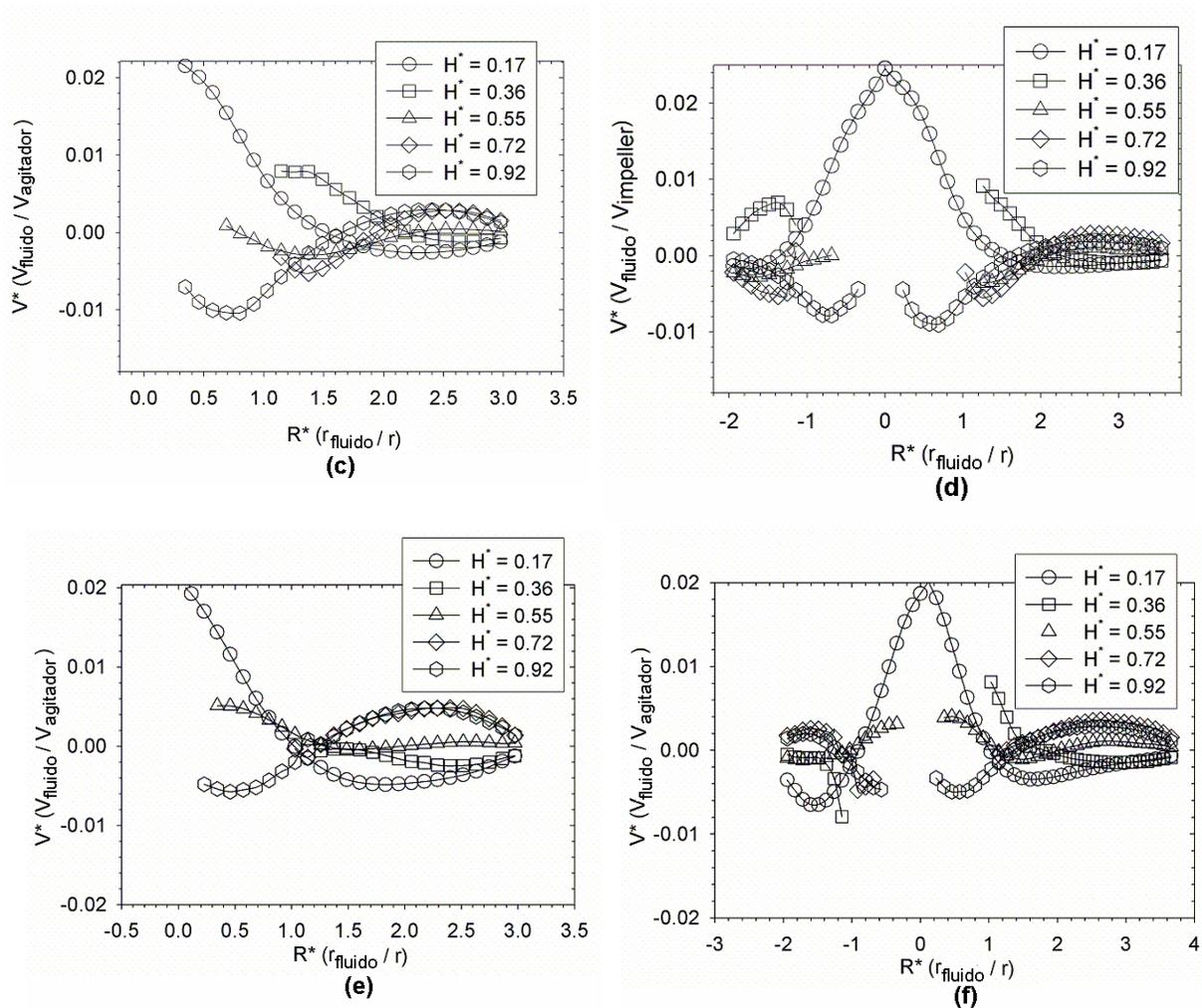


Figura 4.17 Velocidad vertical de dos turbinas Rushton unidas por dos placas de acero: a) Centrada a 0 grados; b) Descentrada a 0 grados; c) Centrada a 60 grados; d) Descentrada a 60 grados; e) Centrada a 120 grados; f) Descentrada a 120 grados. (escala de la barra en mm/s)

En las figuras 4.15 hasta 4.17 se presentan las graficas de la velocidad vertical, todos los escenarios estudiados se encuentran graficados con la misma escala para facilitar su comparación. En este caso se tiene que H^* se define mediante la ecuación siguiente

$$H^* = \frac{H_{ref}}{H} \dots\dots\dots(24)$$

donde:

H^* Altura adimensional en el tanque de mezclado

H_{ref} Altura de un punto específico en el tanque de mezclado

H Altura del nivel de líquido en el interior del tanque de mezclado

En las figuras 4.15 y 4.16 se observa que la velocidad vertical solo se incrementa en las inmediaciones del agitador, mientras que en las zonas cercanas a la pared y las alejadas de los impulsores la velocidad tiende a cero. Este comportamiento se observa al ver las tendencias de las líneas graficadas las cuales permanecen alrededor de un valor cercano a cero y solamente existe un desplazamiento a la altura de los agitadores, el cual al alejarse hacia la pared del tanque agitado tiende al valor de cero. Estas velocidades explican la tendencia de formación de pseudo-cavernas en las inmediaciones del impulsor para ambos casos. En las gráficas de la figura 4.17, se observa un incremento en el valor de la velocidad vertical, principalmente al paso de las paletas unidas por las dos placas, en la imagen 4.17 a y b se observa este incremento como el desplazamiento de las líneas graficadas hacia mayores valores de velocidad en la dirección axial. Este desplazamiento se ve en las figuras 4.17c hasta f, sin embargo, el valor alcanzado es menor al de las paletas unidas. En este impulsor la velocidad vertical presenta un aumento de más del 100 % en magnitud comparado con una o dos turbinas Rushton. Este aumento en la velocidad axial es el resultado de un incremento en el diferencial de presión propiciado por la longitud de las dos placas de acero, provocando un mayor desplazamiento del fluido en la dirección axial. Este incremento se transforma en una mayor circulación del fluido en el interior del tanque, o un incremento en la capacidad de bombeo del agitador (calculado en la sección 4.4.3).

Al considerar que un agitador que transfiere mayor cantidad de movimiento al fluido en régimen laminar en todo el tanque agitado es el que propicia un mejor

mezclado. Debido al mecanismo de alargamiento y contracción del fluido que propicia una mayor transferencia de masa entre los componentes de la mezcla, esta es la principal característica que se ve reflejada en el mejor desempeño del arreglo formado por dos turbinas Rushton unidas con dos placas.

5 Conclusiones

Para estudiar el efecto del uso de perturbaciones geométricas en el proceso de mezclado con diferentes tipos de impulsores en régimen laminar se usó la técnica de colorimetría, la que reveló la formación de estructuras toroidales mejor conocidas como pseudo-cavernas y que impiden un mezclado óptimo. A partir de los experimentos realizados usando colorimetría, se desarrolló una técnica de procesamiento de imágenes para evaluar tiempos de mezclado y nivel de homogeneidad en el tanque de mezclado. Al utilizar la técnica de PIV se determinó la velocidad del flujo en el interior del tanque agitado generado por los impulsores estudiados, su vorticidad y se calculó la capacidad de bombeo para cada uno.

Se diseñó un nuevo arreglo de impulsor, basado en el uso de turbinas Rushton, este estudio reveló mejores tiempos de mezclado para el nuevo agitador, con mayor consumo de potencia, pero con menor consumo de energía para el proceso de mezclado por lotes. Además, el impulsor eliminó las zonas segregadas en el interior del tanque en régimen laminar, redujo el tiempo de mezclado y aumento el nivel de homogeneidad en el tanque agitado. Debido a los mayores diferenciales de presión generados por la incorporación de las placas, resultando en mayores velocidades del fluido.

Al estudiar los patrones de flujo generados mediante la técnica de PIV, se encontró que el agitador propuesto genera una mayor circulación de fluido, el cual se observa en casi la totalidad del tanque de mezclado, en especial al ubicar el agitador en posición excéntrica. A su vez, la velocidad del fluido es mayor y se puede observar una mayor capacidad de bombeo para esta geometría de impulsor.

Con la determinación del campo de velocidad generado por los impulsores, se pudieron calcular parámetros poco estudiados en el proceso de mezclado, tales como la vorticidad y su relación con la generación de estructuras toroidales y la velocidad vertical presente en el tanque de mezclado.

Además, se encontró que el mejoramiento del proceso de mezclado, no está completamente ligado a la capacidad de bombeo del agitador, al encontrar el mismo valor para los impulsores formados por dos turbinas Rushton y el de dos turbinas Rushton unidas, en ambas posiciones centrados y descentrados. Este descubrimiento, requiere de un estudio más profundo, debido principalmente a que se determinó la capacidad de bombeo, a partir de solo dos imágenes para las posiciones excéntricas. Debido a la no simetría del sistema, estas imágenes no parecen ser suficientes para determinar con exactitud todas las variaciones de velocidad presentes en esta clase de arreglos. De aquí se desprende la necesidad de realizar un estudio para determinar la velocidad presente en todo el tanque agitado y poder así determinar la relación entre la capacidad de bombeo, el nivel de homogeneidad y el tiempo de mezclado en los sistemas asimétricos.

Si se requiere un agitador con bajo consumo de potencia y buena capacidad de bombeo, la turbina Rushton en posición excéntrica, es la mejor opción; alto nivel de homogeneidad y menor tiempo de mezclado, así como el menor consumo de energía y mayor nivel de homogeneidad en el menor tiempo de mezclado, se recomienda usar el nuevo diseño de agitador.

Finalmente, en este estudio se demostró que el mezclado puede ser mejorado al utilizar perturbaciones dinámicas con diseños de impulsores que generen mayores diferenciales de presión dentro del tanque de mezclado.

Para continuar con esta línea de investigación, se sugiere realizar este mismo estudio utilizando fluidos con diferentes propiedades reológicas: fluidos pseudoplásticos, dilatantes y viscoelásticos, así como en mezclado con fluidos sensibles a altas velocidades de agitación. Para ello se recomendaría realizar el estudio bajo las mismas condiciones de operación a las estudiadas en este trabajo. Posteriormente se podría realizar la comparación del beneficio obtenido al utilizar el arreglo de agitador propuesto al obtener resultados para diversos fluidos.

6 Apéndices

6.1 Apéndice 1

Artículos generados

En esta sección se presentan los Artículos escritos a partir del desarrollo de este trabajo de investigación. Se reporta la revista a la que se envió, el título del artículo, el resumen del mismo y el lugar de adscripción de todos los autores.

- 1) Artículo enviado a la revista Chemical Engineering & Technology

An Alternative Method for Measuring Mixing Times in Stirred Vessels

Vega-Alvarado, L.¹, Taboada, B.¹, **Hidalgo-Millán, A.**^{1,2} and Ascanio, G.^{1*}

Abstract

A new image analysis method has been developed for measuring mixing times in stirred vessels. The method consists of capturing images of the flow patterns observed in the agitated vessel by using a fast acid-base indicator reaction technique. Such images are analyzed to quantify the color evolution by means of a hue, light and saturation color model (HLS) corresponding to the mixing evolution. When comparing with other techniques such as the one based on the red, green and blue channels (RGB) the proposed methodology allows analyzing the mixing evolution accurately irrespective of the tracer color while reducing the subjectivity of the estimation of mixing times by the human eye.

1. Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, DF 04510, México

2. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, DF 04510, México

- 2) Artículo enviado a la revista Industrial and Engineering Chemistry Research

STUDY OF LAMINAR FLOW IN STIRRED VESSELS WITH OFF-CENTERED IMPELLERS

Hidalgo-Millán, A.¹, Taboada, B.², Vega-Alvarado, L.², Zenit, R.³, and Ascanio, G.^{2*}

1. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad universitaria, 04510 DF, México
2. Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad universitaria, 04510 DF, México
3. Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad universitaria, 04510 DF, México

Abstract

Geometrical perturbations by using single and coaxial impellers configurations have been investigated in the laminar regime ($Re=2.68$) in unbaffled stirred vessels. Combinations of one and two coaxial radial discharge flow impellers under centered and eccentric conditions were studied with viscous Newtonian fluids. The study of geometrical perturbations has been made in terms of the mixing times, energy consumption and the flow fields. Homogenization degrees and mixing times, determined with a color-discoloration technique, were evaluated by means of image processing. The flow fields were investigated using the particle image velocimetry technique. The use of eccentric impellers increases the pumping capacity; however, little effect of eccentricity was obtained when using two coaxial impellers under off-centered conditions obtaining the best results with a novel configuration consisting of a dual turbine with connecting plates.

3) Artículo enviado a la revista The Canadian Journal of Chemical Engineering

EFFECT OF ECCENTRICITY ON THE PUMPING CAPACITY IN AN UNBAFFLED VESSEL

Hidalgo-Millán, A.¹, Soto, E.¹, Zenit, R.² and Ascanio, G.¹

- 1) Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad universitaria, 04510 DF, México.
- 2) Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad universitaria, 04510 DF, México.

Abstract

The aim of this work is to investigate the effect of the shaft eccentricity on the pumping capacity number. This pumping number was calculated in a stirred vessel with the aid of Particle Image Velocimetry (PIV) in centric and eccentrically impeller position. For the eccentrically position, nineteen different planes in the azimuthal direction were taken to obtain a correctly reliable average velocity into the whole tank. The velocity and vorticity fields were performed for all the positions. Two different impellers were studied, a Rushton turbine and a standard 45° pitched blade turbine (PBT), both were operated at two different Reynolds numbers 8 and 901. The pumping number increases considerably with eccentricity for the case of the Rushton turbine (radial flow), whereas the effect for the PBT turbine (axial flow) is negligible.

6.2 Apéndice 2

Participación en congresos y estancias

Internacionales

- North American Mixing Forum, Mixing XXII, Victoria, BC. Canadá, 20/25 junio, 2010
- Estancia de investigación en el Laboratoire de Genie Chimique en el Institut National Polytechnique de Toulouse Francia.
- 61st Annual Meeting of the American Physics Society. *Division of fluids Dynamics*, en San Antonio Texas. 23-25 de noviembre de 2008.
- VI International Symposium on Mixing in Industrial Processes, Niagara-on-the-lake, Canadá, 17-21 agosto, 2008.

Nacionales

- SOMI XXIII Congreso de Instrumentación, Xalapa, Ver., 2008.

7 Bibliografía

Adrian, R. J., 1996, "Laser Velocimetry", in R. J. Goldstein (Ed.), Fluid Mechanics Measurements, 2^{da} Ed., (Taylor & Francis, Washington, D.C.), pp. 175-299.

Alvarez, M., Arratia, P.E. and Muzzio, F.J., 2002, "Laminar Mixing in Eccentric Stirred Tank Systems", Can. J. Chem. Eng., 80, 546-557.

Alvarez, M., Guzmán, A. and Elías, M. 2005, "Experimental visualization of mixing pathologies in laminar stirred tank bioreactors", Chem. Eng. Sci., 60, 2449-2457.

Amanullah, A., Hjorth, S.A. and Nienow, A. W., 1997, "A new mathematical model to predict cavern diameters in highly shear thinning, power law liquids using axial flow impellers", Chem. Eng. Sci., 53 (3), 455-469.

Aref, H., 1984, "Stirring by Chaotic Advection", J. Fluid Mech., 143, 1-21.

Aref, H. and Balachandar, S., 1986 "Chaotic Advection in a Stokes Flow", Phys. Fluids, 29, 3515-3521.

Arriata, P.E., Kukura, J., Lacombe, L. and Muzzio F.J., "Mixing of Shear-Thinning Fluids with Yield Stress in Stirred Tanks", AIChE J., 52, 2310-2321.

Ascanio, G., Brito-Bazan, M., Brito-De La Fuente, E., Carreau, P.J. and Tanguy, P.A., 2002, "Unconventional Configuration Studies to Improve Mixing Times in Stirred Tanks", Can. J. Chem. Eng., 80, 558-565.

Ascanio, G., Tanguy, A. P., 2004. "Mixing of Shear-Thinning fluids with Dual off-Centred Impellers". Can. J. Chem. Eng., 83, 393-400.

Ascanio, G., Brito-Herrera, J.M., Taboada, B., Corkidi, G. and Ramos, E., 2006, "3-D imaging of flow structures in stirred vessels", 12th European Conference on Mixing, Boloña, Italia, junio 2006.

Baudou, C., Xuereb, C., Costes, J., Ranchin, G., and Bertrand, J., 1997, "Laser Doppler measurements of Flow Fields and Turbulent Flow Parameters in a Stirred Tank equipped with two Industrial Propellers", in Bertrand, J. and Villiermaux, J. (Eds.), Récents Progrès en Génie des Procédés, (Lavoisier, Paris) 11 (51), pp. 11-18.

Benayad, S., David, R., and Cognet, G., 1985, "Measurements of coupled velocity and concentration fluctuations in the discharge flow of a Ruashton turbine in a stirred tank", Chem. Eng. Process. 19: 157-165.

Bresler, L., Shinbrot, T., Metcalfe, G. and Ottino, M., 1997. "Isolated Mixing Regions: Origin, Robustness and Control", Chem. Eng. Sci., 52, 1623-1636.

Brito-De La Fuente, E., Hernández, S., Segura, A., Medina, L., Tanguy, P. A. and Ascanio, G., 1999. "Laminar Mixing in Stirred Tanks Using Dynamics Perturbations and non-Symmetric Geometry Conditions", in "Proc. VI Pan-American Congress in Applied Mechanics" Rio de Janeiro, Brazil.

Cabaret, F., Bonnot, S. and Tanguy, P.A., "Mixing Time Analysis Using Colorimetric Methods and Image Processing", Ind. Eng. Chem. Res. 2007, 46; 5032-5042.

Coulson, J. M. and Richardson, J. F., 1993, "Chemical Engineering, Fluid Flow, Heat Transfer & Mass transfer", BBPCC Wheatons Ltd., Exeter. Great Britain.

Chang, T. P. K., Watson, A. T. and Tatterson, G. B., 1985, "Image processing of tracer motions as applied to mixing and turbulent flow. I. The technique", Chem. Eng. Sci., 40, 277-285.

De La Villeon, J., Bertrand, F., Tanguy, P. A., Labrie, R., Bousquet, J. and Lebouvier, D., "Numerical investigation of mixing efficiency of helical ribbons", *AIChE J.*, 44, (4), 972-977.

Desouza, A. and Pike, R. 1972., "Fluid dynamics and flow patterns in stirred tank with a turbine impeller", *Can. J. Chem. Eng.*, 50, 15-23.

Elson, T.P., Cheesman, D.J. and Nienow, A.W., 1986, "X-ray Studies of Cavern Sizes and Mixing Performance with Fluids Possessing a Yield Stress", *Chem. Eng. Sci.*, 41, 2555-2562.

Espinosa-Solares, T., Brito-de la Fuente, E., Tecante, A., Medina-Torres, L., and Tanguy, P. A., 2002, "Mixing time in rheological involving model fluids by hybrid dual mixing systems", *ICHEME*, 80 part A, 817-823.

Foucault, S., Ascanio, G. and Tanguy, P., 2005, "Power characteristics in coaxial mixing: Newtonian and non-Newtonian fluids", *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 5036-5043.

Foucault, S., Ascanio, G. and Tanguy, P., 2006, "Mixing times in coaxial mixers with Newtonian and non-Newtonian fluids", *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 352-359.

Franjione, J. G., Leong, C. W. and Ottino, J. M., 1989, "Symmetries within Chaos: A Route to Effective Mixing", *Phys. Fluids*, 1, 1772-1783.

Galindo, E., Arguello, A. M., Velasco, D., Albiter, V. and Martínez, A., 1996. "A comparison of cavern in mixing a yield stress fluid by Rushton and intermig impellers", *Chem. Eng. Technol.* 19, 315-323.

Hall, J. F., Barigou, M., Simmons, M. J. H. and Stitt, E. H., 2005, "A PIV study of hydrodynamics in gas-liquid high throughput experimentation (THE) reactors with eccentric impeller configurations", *Chem. Eng. Sci.*, 60, 6403-6413.

Harnby, N., Edwards, M. F. and Nienow, A. W., 1992, "Mixing in the process industries", Butterworth-Heinemann Ltd. Great Britain 1992.

Hirata, Y. and Aoshima, Y., 1996, "Formation and growth of cavern in yield stress fluids agitated under baffled and non-baffled conditions", Trans IChemE, 74, Part A, 438-444.

Holden, P. J., Wang, M., Mann, R., Dickin, F. J. and Edwards R. B., 1999, "On Detecting Mixing Pathologies Inside a Stirred Vessel Using Electrical Resistance Tomography". Trans IChemE, 77, Part A, 709-712.

Karcz, J., Cudak, M., and Szoplik, J., 2005, "Stirring of a Liquid in a Stirred Tank with an Eccentrically Located Impeller", Chem. Eng. Sci., 60, 2369-2380.

Kato, Y., Hiraoka, S., Tada, Y., Koh, S. T. and Lee, Y. S., 1996, "Mixing time and power consumption for a liquid in a vertical cylindrical vessel, shaken in a horizontal circle", IChemE, 74, part A, 451-455.

Kumaresan, T., Nere, N. and Joshi, J., 2005, "Effect of internals on the flow pattern and mixing in stirred tanks", Ind. Eng. Chem. Res. 44, 9951-9961.

Kurada, S., Rankin, G. W., and Sridhar, K., 1994, "Flow visualization using photochromic dyes a-review", Optics & Laser Eng., 20, 177-192.

Kawase, Y., Shimizu, K., Araki, T. and Shimodaira, T., 1997, "Hydrodynamics in three-phase stirred tank reactors with non-Newtonian fluids", Ind. Eng. Chem. Res., 36, (1), 270-276.

Lamberto, D. J., Muzzio, F. J. and Swanson, P. D., 1996, "Using Time-Dependent RPM to Enhance Mixing in Stirred Vessels", Chem. Eng. Sci., 51, 733-741.

Lamberto, D.J., Alvarez, M.M. and Muzzio, F.J., 1999, "Experimental and computational investigation of the laminar flow structure in a stirred tank", Chem. Eng. Sci., 54, 919-942.

Lee, K. C., and Yianneskis, M., 1997, "A liquid cristal thermographic technique for the measurement of mixing characteristics in stirred vessels, Chem. Eng. Res. Des., 75A, 746-754.

Manna, L., 1997, "Comparison between physical and chemical methods for the measurement of mixing times", Chem. Eng. J., 67, 167-173.

Mavros, P., 2001, "Flow Visualization in Stirred Vessels, A Review of Experimental Techniques", Trans IChemE, 79, Part A, 113-127.

Montante, G., Bakker, A., Paglianti, A. and Magelli, F., 2006, "Effect of the Shaft Eccentricity on the Hydrodynamics of Unbaffled Stirred Tanks", Chem. Eng. Sci., 61, 2807-2814.

Muzzio, F. J., Swanson, P.D. and Ottino, J. M., 1991, "The Statics of Stretching and Starting in Chaotic Flows", Phys. Fluids, A 3, 822-834.

Muzzio, F. J., Meneveau, C., Swanson, P.D. and Ottino, J. M., 1992, "Scaling and Multifractal Properties of Mixing in Chaotic Flows", Phys. Fluids, A 4, 1439-1456.

Norwood, A. B., Metzner, A. B., 1960 "Flow Patterns and Mixing Rates in Agitated Vessels" AIChE J., 6(3) , 432-437.

Ottino, J. M., Leong, C. W., Rising, H. and Swanson, P. D., 1988 "Morphological Structures Produced by Mixing in Chaotic Flows", Nature, 333, 419-425.

Plataniotis K. and Venetsanopoulos A., 2000, "Color Image Processing and Application". Ed. Springer.

Rice, M., Hall, J., Papadakis, G. and Yianneskis, M., "Investigation of laminar flow in a stirred vessel at low Reynolds numbers", Chem. Eng. Sci., 61, 2762-2770.

Rivera, C., Foucault, S., Heniche, M., Espinosa, S. T. and Tanguy A. P., 2006. "Mixing analysis in a coaxial mixer", Chem. Eng. Sci., 61, 2895-2907.

Ruszkowski, S. M. and Muskett, M. J., 1985, "Comparative mixing times for stirred tank agitators", Proc. 5th European Conf. on Mixing, Wurzburg, 10-12 June, BHRA, 89-104.

Solomon, J., Elson, T.P., Nienow, A.W. and Pace, G.W., 1981, "Cavern sizes in agitated fluids with a yield stress", Chem. Eng. Comm., 11, 143-164.

Swanson, P. D. and Ottino, J. M., 1990 "Comparative Computational and Experimental Study of Chaotic Mixing of Viscous Fluids", J. Fluid Mech., 213, 227-249.

Tanguy, P. A., Thibault, F., Brito-De La Fuente, E., Espinosa-Solares, T. and Tecante, A., 1996. "Mixing performance induced by coaxial flange blade-helical ribbon impellers rotating at different speeds", Chem. Eng. Sci., 52(11), 1733-1741.

Tattersson, B., 1991, "Fluid mixing and gas dispersion in agitated tanks", McGraw-Hill, Inc. United States.

Unger, D. R., and Muzzio, F. J., 1999, "Laser-induced fluorescence technique for the quantification of mixing in impinging jets", AIChE J., 45 (12); 2477-2486.

Van Barneveld, J., Smith, W., Oosterhuis, N. M. G., and Praght, H.J., 1987, "Measuring the liquid circulation time in a large gas-liquid contactor by means of a radio pill. 2. Flow pattern and mean circulation time, Ind. Eng. Chem. Res., 26, 2185-2192.

Wächter, P., Steidl, W., Höfken, M., and Durst, F., 1996, "Application of the ultrasound velocity measuring techniques to stirred vessel flows" in Takeda, Y.,

and Ravoux, J.-F. (Eds.), Proceedings 1st Inter. Symp. Ultrasonic Doppler Methods in Fluids Mechanics and Fluid Engineering (Paul Scherer Institute, Villigen, Switzerland, 9-11 Sept.), vol. II, pp. 31-62.

Wichterle, K. and Wein, O., 1975, "Agitation of concentrated suspensions", *CHISA '75, Prague, Czechoslovakia*, Paper B4.6.

Wu, H. and Patterson, G.K., 1989, "Laser-Doppler measurements of turbulent flow parameters in a stirred mixer", *Chem. Eng. Sci.* 44, 2207-2213.

Xuereb, C., Poux, M. and Bertrand, J., 2006, "Agitation et Mélange: Aspects fondamentaux et applications industrielles", Ed. Dunod, France.

Yao, W. G., Sato, H., Takahashi, K. and Koyama, K., 1998. "Mixing performance experiments in impeller stirred tanks subjected to unsteady rotational speeds", *Chem. Eng. Sci.*, 53(17), 3031-3040.

Yap, C. Y., Patterson, W. I. and Carreau, P.J., 1979, "Mixing with helical ribbon agitators, Part III: Non-Newtonian fluids", *AIChE J.* 25, 516-521.

Zadghaffari, R., Moghaddas, J.S. and Revstedt, J., 2009, "A mixing study in a double-Rushton stirred tank", *Compt. Chem. Eng.*, 33, 1240-1246.

<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=820>. 5/02/2010