



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

VISUALIZACION DE ESTRUCTURAS DE FLUJO
EN TANQUES AGITADOS CON IMPULSORES
EXCENTRICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O Q U I M I C O

P R E S E N T A :

JUAN CARLOS HERNANDEZ MAYA



MÉXICO, D.F.

2007



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 Prof. ANTONIO VALIENTE BARDERAS

Vocal Prof. FRANCISCO LOPEZ SERRANO RAMOS

Secretario Prof. GABRIEL ASCANIO GASCA

1er. Suplente Prof. OCTAVIO MANERO BRITO

2do. Suplente Prof. EDTSON EMILIO HERRERA VALENCIA

Sitio en donde se desarrolló el tema: **CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y
DESARROLLO TECNOLOGICO (CCADET).**

ASESOR: Dr. GABRIEL ASCANIO GASCA

SUPERVISOR TECNICO: Q. JOSEFINA ELIZALDE TORRES

SUSTENTANTE: JUAN CARLOS HERNANDEZ MAYA

DEDICO ESTE TRABAJO

A mis padres.

Roberto Hernández y Evodia Maya.

Que son los pilares de mi vida y por ser lo que más amo también. Gracias por todo el apoyo que me han brindado en todo momento que han estado a mi lado. Esto es solo un paso mas de lo que han logrado sus consejos y su amor y no será el último. LOS AMO MAS QUE A MI VIDA.

A mis hermanos.

Lorena, Marisol, Vanesa y Roberto

Gracias por estar siempre a mi lado y por darme su apoyo incondicional. Siempre han sido y serán parte de los logros que pueda tener. Recuerden que esto también es logro de ustedes. LOS AMO.

A los que han llegado a mi familia y que me han brindado su apoyo. Gracias Arturin, Memo, Nacho, Karen por estar siempre conmigo y por la confianza que nos hemos logrado tener, ustedes también son parte de este logro. LOS QUIERO MUCHO.

A los niños que mas quiero en la vida Carito, David y a quien esperamos con ansias. Simplemente han mejorado mi vida y han logrado que me empeñe más por hacer las cosas mejor, algún día entenderán lo que significan para mí. LOS AMO.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Gabriel Ascanio Gasca por todo el apoyo y confianza que me ha brindado para llegar a concluir este trabajo. Gracias por sus consejos y por ser la persona tan recta y humana que es.

A la profesora Josefina Elizalde Torres por haberme brindado su apoyo y confianza por todo este tiempo, Siempre ha sido parte de todo lo que he logrado. Gracias

A todas las personas que han estado a mi lado por este largo camino, recuerden que cuentan con mi apoyo incondicional siempre. KITZI, ANGELIQUITA, MALENONA, LUPITA, CACHORRA, MONICA, CECY, ENRRIQUE, HUGO, SAUL, URIEL, ISAIAS, JOSE LUIS y también a los que no estuvieron directamente en este paso pero que siempre han estado ahí. OSCAR, CARLOS, LALITO, FER, LUIS, LAURA. Y todos los que me faltaron Los quiero mucho.

A mis compañeros de laboratorio que me han ayudado y aconsejado para mejorar este trabajo. JAVIER, ANTONIO, JUAN MANUEL, MIGUEL, RODOLFO, JULIO e IGMAR.

Al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico por ser la casa de realización de este trabajo, Al Centro de Investigación de Energía y en especial a Guillermo Hernández por el apoyo y ayuda que me brindo.

A La Facultad de Química y a los maestros que compartieron sus conocimientos que han hecho de mi un orgulloso egresado de la carrera de Ingeniería Química.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la educación y la esencia de la persona que soy. Por sentirme parte de ella sin duda. ORGULLO UNAM

ÍNDICE GENERAL

Lista de Figuras.....	IV
Nomenclatura y Abreviaturas.....	VII

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Definición de un fluido	1
1.2 Mezclado	2
1.3 Tanque agitado mecánicamente.....	3
1.4 Velocidades de deformación y esfuerzos de corte.....	4
1.5 Flujo laminar y flujo turbulento.....	5
1.6 Número de Reynolds.....	6
1.7 Sustancias de mezclado.....	7
1.8 Viscosidad.....	9
1.9 Fluidos newtonianos.....	9
1.0 Fluidos no-newtonianos.....	10
1.11 Reología.....	11

CAPITULO 2

MEZCLADO EN TANQUES AGITADOS

2.1 Revisión de la literatura.....	12
------------------------------------	----

CAPITULO 3

METODOS Y MATERIALES

3.1 Arreglo experimental.....	22
3.2 Fluidos.....	25
3.3 Técnicas de visualización.....	25
3.3.1 Velocimetría de Partículas.....	25
3.3.2 Fluorescencia Inducida por láser.....	27
3.4 Condiciones experimentales.....	28
3.5 Esquema (Condiciones de trabajo).....	30

CAPITULO 4
RESULTADOS

4.1 Presentación.....32
4.2 Fluorescencia Inducida por láser.....36
4.3 Velocimetría de Partículas.....46

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS.....51
CONCLUSIONES.....57
BIBLIOGRAFÍA.....58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. *Impulsores: a) Rushton, b) Rayneri-Sevin, c) Hybrid y d) PBT.*

Figura 2. *Perfil de velocidades en la paleta del impulsor.*

Figura 3. *Flujo laminar de un fluido perfecto en torno al perfil de un objeto.*

Figura 4. *Distribución de velocidades en un tubo con flujo laminar.*

Figura 5. *Distribución de velocidades al interior de un tubo con flujo turbulento.*

Figura 6. *Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido newtoniano.*

Figura 7. *Tanque agitado típico*

Figura 8. *Mezclado en tanque agitado a una velocidad dependiente del tiempo. a) las regiones segregadas son evidentes después de un mezclado a 100 rpm por 30.5 min; b) mezclado a 10 s; c) mezclado a 20 s; y d) 30 s. Después de que la velocidad del impulsor ha sido reducida a 50 rpm. e) mezclado a 10s. y f) 20 s.*

Figura 9. *Sistema HCl + NaOH para diferentes Reynolds. Columna izquierda $Re=150$ y columna derecha $Re=250$ y diferentes posiciones a lo largo del agitador a) $z= 500 \mu m$, b) $z= 5000 \mu m$, c) $z= 10\ 000 \mu m$ y d) $z= 500 \mu m$, e) $z= 5000 \mu m$, f) $z= 10\ 000 \mu m$ (geometría del micro-mezclado $600 \times 300 \times 270 \mu m$).*

Figura 10. *a) Los puntos rojos son las burbujas que pasan a través del abanico del láser; b) imagen correlacionada por medio de vectores se representa la velocidad y dirección de las burbujas.*

Figura 11. *a) Experimento con agitadores; b) Experimento con discos y c) Experimentos con la combinación de agitadores y discos.*

Figura 12. *Arreglo experimental.*

Figura 13. *Montaje experimental para PIV.*

Figura 14. *Montaje experimental para LIF.*

Figura 15. *Esquemas de las condiciones de trabajo.*

Figura 16. *Estructura de flujo formadas con un impulsor PBT.*

Figura 17. *Estructuras de flujo formadas con impulsor Rushton.*

Figura 18. *Patrones de flujo a condiciones centradas mediante LIF.*

Figura 19. *Patrones de flujo a condiciones excéntricas (agitador descentrado 5mm) mediante LIF.*

Figura 20. *Secuencia de imágenes (a) $t= 2$ min; b) $t= 10$ min; c) $t= 20$ min; y d) $t= 30$ min en la formación de cavernas para una turbina Rushton desplazado del centro del tanque de agitación a 5 mm.*

Figura 21. *Patrón de flujo a condiciones centradas y sin tratar con PIV.*

Figura 22. *Imagen tratada con MATLAB para el caso centrado con PIV.*

Figura 23. *Patrón de flujo observado con PIV con la turbina excéntrica a 10 mm.*

Figura 24. *Imagen tratada con MATLAB para el caso donde la turbina se desplaza 10 mm.*

Figura 25. *Patrón de flujo observado con PIV con la turbina excéntrica a 20 mm.*

Figura 26. *Imagen tratada con MATLAB para el caso donde la turbina se desplaza 20 mm.*

Figura 27. *Patrón de flujo observado con PIV. a) $t= 5$ min; b) $t= 15$ min; c) $t= 25$ min; d) $t= 35$ min. (secuencia de formación de la caverna).*

Figura 28. *Acercamiento del efecto, punto silla.*

Figura 29. *Gráficas representativas de la velocidad de una partícula, para la turbina centrada, donde: a) movimiento sobre el eje X; b) movimiento sobre el eje Y y c) Velocidad absoluta de la partícula.*

Figura 30. *Gráficas representativas de la velocidad de una partícula para la turbina desplazada 20 mm, donde: a) movimiento sobre el eje X; b) movimiento sobre el eje Y y c) Velocidad absoluta de la partícula.*

NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

ρ	Densidad del fluido.
N	Velocidad de rotación del impulsor.
μ	Viscosidad dinámica del fluido.
D	Diámetro del impulsor (longitud característica).
τ_{xy}	Esfuerzo cortante.
μ	Viscosidad dinámica del fluido.
du/dy	Velocidad de deformación del fluido.
v	Velocidad absoluta
V_x	Velocidad de la partícula en X
V_y	Velocidad de la partícula en Y
PBT	turbina de paletas inclinadas
LIF	fluorescencia inducida por láser
PIV	velocimetría de la partícula

CAPITULO 1

En este capítulo se dan algunos conceptos básicos que describen el comportamiento de los fluidos, como algunas de sus propiedades que son tomadas en cuenta para el estudio en la presente tesis.

ANTECEDENTES

1.1 Definición de fluido

Para clasificar a los materiales que se encuentran en la naturaleza se pueden utilizar diversos criterios. Desde el punto de vista de la ingeniería, uno de los más interesantes lo constituye aquel que considera el comportamiento de los elementos frente a situaciones especiales. De acuerdo a ello se definen los estados básicos de sólido, plástico, fluidos y plasma. De aquí la definición que nos interesa es la de fluidos, la cual se clasifica en líquidos y gases [18].

La clasificación de fluidos mencionada depende fundamentalmente del estado y no del material en sí. De esta forma lo que define al fluido es su comportamiento y no su composición. Entre las propiedades que diferencian el estado de la materia, la que permite una mejor clasificación sobre el punto de vista mecánico, es la que dice la relación con la forma en que reacciona el material cuando se le aplica una fuerza.

Los fluidos reaccionan de una manera característica a las fuerzas. Si se compara lo que ocurre a un sólido y a un fluido cuando son sometidos a un esfuerzo de corte o tangencial se tienen reacciones características que se pueden verificar experimentalmente y que permiten diferenciarlos [18].

Con base al comportamiento que desarrollan los fluidos se definen de la siguiente manera: "Fluido es una sustancia que se deforma continuamente, o sea se escurre, cuando está sometido a un esfuerzo de corte o tangencial". De esta

definición se desprende que un fluido en reposo no soporta ningún esfuerzo de corte.

1.2 Mezclado

El mezclado es una de las operaciones unitarias de la ingeniería química más difícil de someter a un análisis científico. Es el proceso mediante el cual varios ingredientes se ponen en contacto, de tal forma que al final de la operación se obtiene un sistema homogéneo a cierta escala (desde molecular hasta macroscópica). Según la escala del mezclado y la miscibilidad relativa de las sustancias en presencia, el resultado puede ser una solución, un coloide, o una dispersión micro o macroscópica: emulsión, suspensión o espuma. El mezclado de fluidos tiene numerosas aplicaciones en fermentación, dispersión de polvos y pigmentos, emulsiones, productos de cuidado personal, etc. Hasta el presente no se ha desarrollado ninguna fórmula o ecuación aplicable al cálculo de la realización a la que se verifica la mezcla, o la velocidad con que se realiza, en determinadas condiciones [20].

A pesar de que las propiedades reológicas son las variables que más influyen en la selección del tipo de mezcla, a nivel industrial el mezclado cobra otras dimensiones, pues las restricciones para el equipo y el tipo de mezclado aumentan en función de la reducción de costos. Para hacer mas eficiente el mezclado y satisfacer todas las necesidades de la industria, es necesario hacer estudios exhaustivos sobre todos los elementos que intervienen en el, enfocándose principalmente al equipo físico y a las sustancias de trabajo. El objetivo de las investigaciones relacionadas con las sustancias de trabajo es conocer su comportamiento al aplicarle un esfuerzo, sus propiedades físicas y en algunos casos las químicas [20].

El principio del mezclado es que las sustancias que interactúan sufran deformaciones. Los investigadores basan y sustentan sus trabajos por medio de

una ciencia llamada reología que se encarga del estudio de la deformación y flujo de materia.

1.3 Tanque agitado mecánicamente

El equipo de mezclado mas comúnmente usado en las operaciones de proceso, es el tanque agitado mecánicamente. El diseño de estos tanques involucra diferentes aspectos, como son: la selección del tanque (material de construcción, diseño geométrico, utilización de deflectores, etc.), así como los sistemas de agitación, de aireación, de enfriamiento, de adición de nutrientes, además de monitoreo y control de las variables importantes del proceso [20].

Diseñar un mezclador significa establecer sus características de tal manera que cumpla con sus funciones básicas de homogenización. En el caso de los tanques agitados, el diseño incluye el establecimiento de:

- a) sus dimensiones geométricas.
- b) el número y tipo de impulsores.
- c) la capacidad del motor.
- d) el diseño mecánico (tanque, boquillas, conexiones, puertos, flecha, sellos, etc.).

La mayoría de los tanques de mezclado a escala de laboratorio están fabricados de vidrio con tapas de acero inoxidable, mientras que los de nivel industrial son fabricados en acero inoxidable. La relación entre la altura del liquido y el diámetro del tanque (h/T), en los mezcladores industriales, es generalmente de 2:1 o 3:1, siendo la estándar $h=T$, donde h es la altura del fluido (m) y T es el diámetro del tanque (m) usada como parámetro de diseño. Usualmente, el sistema de agitación consta de dos o tres impulsores. La relación entre el diámetro del impulsor y el diámetro del tanque es generalmente de 0.3 a 0.5. La distancia mas común entre cada impulsor es de 1.0 a 1.5 veces el diámetro del impulsor. Es común instalar

cuatro deflectores equidistantes, cuya finalidad es la de evitar la formación de vórtices que reducen considerablemente la eficiencia del mezclado [20].

En los sistemas de agitación mecánica, se utilizan diferentes tipos de impulsores y diferentes configuraciones (figura 1), cuyo objetivo es provocar el movimiento y mezclado del fluido en el tanque. En el área de fluidos incompresibles, existen generalmente dos tipos de impulsores (dependiendo de la relación de diámetros entre el impulsor y el tanque contenedor): a) los denominados impulsores pequeños, los cuales trabajan por lo general, en regímenes de flujo turbulento y se ocupan para viscosidades cercanas a las del agua; y b) los denominados impulsores de proximidad, que se ocupan para el mezclado de fluidos altamente viscosos o de comportamiento reológico complejo y que por lo general trabajan en régimen laminar.

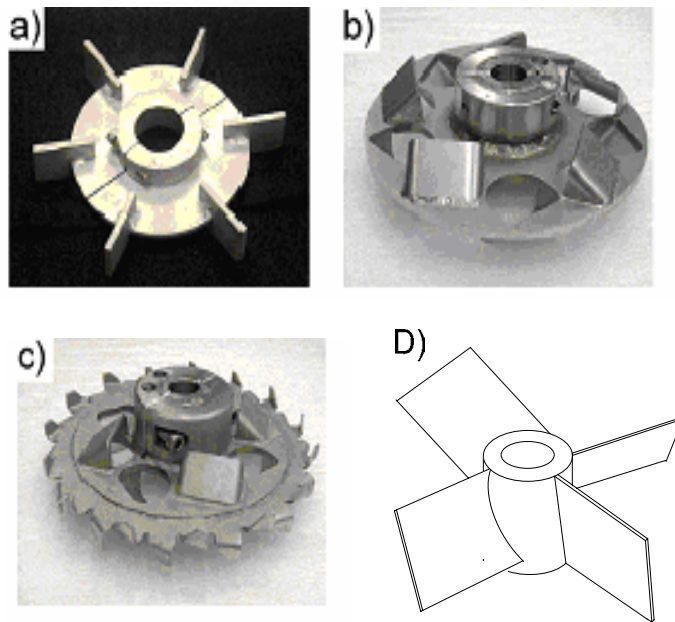


Fig. 1. Impulsores: a) Rushton, b) Rayneri-Sevin, c) Hybrid d) PBT.

1.4 Velocidades de deformación y esfuerzos de corte

Como se muestra en la figura 2, cuando un impulsor se encuentra en movimiento dentro del fluido, crea en el área opuesta a sus paletas, un perfil de velocidades como el indicado. Podemos definir la velocidad de deformación como el gradiente

de velocidades tomado en cualquier punto y esta determinada por el impulsor y por la viscosidad del fluido. El esfuerzo cortante es el producto de la velocidad de deformación por la viscosidad que impera en esa zona y es el responsable de llevar a cabo el proceso de mezclado que da como resultado la dispersión de burbujas de gas o el que produce el intermezclado de fluidos a escala microscópica.



Fig.2. Perfil de velocidades en la paleta del impulsor.

1.5 Flujo Laminar y Flujo Turbulento

Flujo laminar

Se llama flujo laminar al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, estratificado, de manera que el fluido se mueve en laminas paralelas, o en capas cilíndricas coaxiales (figura 3) como, por ejemplo la glicerina en un tubo de sección circular, sin mezclarse entre sí (figura 4).

La pérdida de energía es proporcional a la velocidad media. La repartición de la velocidad tiene forma de una parábola, donde la velocidad máxima se encuentra en el eje del tubo y la velocidad es igual a cero en la pared del tubo.

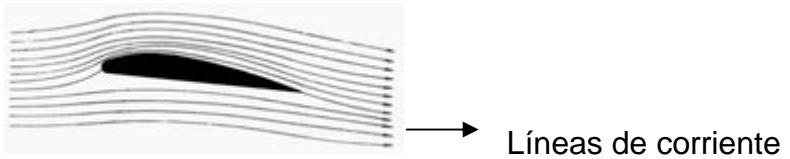


Fig. 3. Flujo laminar de un fluido perfecto en torno al perfil de un objeto.

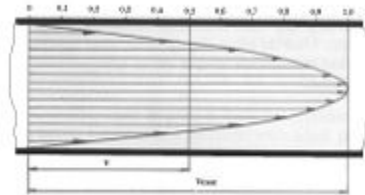


Fig. 4. Distribución de velocidades en un tubo con flujo laminar.

Se llama flujo turbulento al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, en que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos (figura 5).

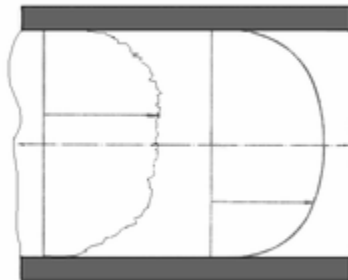


Fig. 5. Distribución de velocidades al interior de un tubo con flujo turbulento

1.6 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido.

Como todo número adimensional es un cociente, una comparación. En este caso, es la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de **Navier-Stokes** que gobiernan el movimiento de los fluidos.

El número de Reynolds permite predecir el carácter turbulento o laminar en ciertos casos. Así por ejemplo, en conductos, si el número de Reynolds es menor a 2000 el flujo será laminar y si es mayor de 4000 el flujo será turbulento.

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu} \text{ ----- (1)}$$

Donde:

ρ = densidad del fluido.

N = Velocidad de rotación del impulsor.

μ = viscosidad dinámica del fluido.

D = Diámetro del impulsor (longitud característica).

1.7 Sustancias de Mezclado

En cualquier área de la ingeniería es necesario conocer el comportamiento de los materiales. Para entender las deficiencias del mezclado y abrirse camino para encontrar las posibles soluciones que mejoren los resultados en los productos, el conocimiento de las propiedades de las sustancias de trabajo ocupa uno de los primeros lugares de importancia. Para facilitar su estudio y comprensión se han sugerido diversas clasificaciones de materiales [19]. Los materiales se pueden clasificar de una manera general como:

- fluidos

- a) inelásticos dependientes del tiempo.
- b) inelásticos independientes del tiempo.
- c) viscoelásticos.

- sólidos.

- a) elástico.
- b) viscoelástico.

- plásticos.

Desde el punto de vista de varios autores los sólidos y los fluidos son los únicos dos estados en los que se presenta la materia. La diferencia técnica entre sólidos y fluidos radica en la reacción de ambos ante un esfuerzo cortante o tangencial. Un sólido puede resistir un esfuerzo cortante con una deformación estática; un fluido no. Cualquier esfuerzo cortante aplicado a un fluido, por pequeño que sea, provoca un movimiento al fluido. Sin embargo, es necesario particularizar a los materiales plásticos, los cuales tienen un comportamiento de sólido a pequeños esfuerzos cortantes y de fluido a un esfuerzo cortante finito relativamente grande.

Por otro lado, se puede intuir que los fluidos son las sustancias más utilizadas en las operaciones de mezclado. El área de estudio de estos materiales es muy extensa, por lo que para enfocar y particularizar en los trabajos de investigación sobre las propiedades de los fluidos, se han clasificado a estos dentro de varias categorías [19], algunas de ellas son:

En función de la velocidad de deformación

- newtonianos.
- no newtonianos.

por su viscosidad

- altamente viscosos.
- viscosidad baja (no viscosos).

1.8 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad distintiva de los fluidos. Está ligada a la resistencia que opone un fluido a deformarse continuamente cuando se le somete a un esfuerzo de corte. Esta propiedad es utilizada para distinguir el comportamiento entre fluidos y sólidos. Además los fluidos pueden ser en general clasificados de acuerdo a la relación que existe entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación.

1.9 Fluidos newtonianos

Un fluido newtoniano se caracteriza por cumplir la Ley de Newton, es decir, que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Si por ejemplo se triplica el esfuerzo cortante, la velocidad de deformación se va a triplicar también. Esto es debido a que el término μ (viscosidad) es constante para este tipo de fluidos y no depende del esfuerzo cortante aplicado.

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \text{ ----- (2)}$$

siendo:

τ_{xy} = esfuerzo cortante.

μ = viscosidad dinámica del fluido.

du/dy = velocidad de deformación del fluido.

Hay que tener en cuenta también que la viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre.

Para una mejor comprensión de este tipo de fluido se representan dos tipos de gráficas, la “Curva de fluidez” y la “Curva de viscosidad” [8]. En la Curva de Fluidez se grafica el esfuerzo cortante frente a la velocidad de deformación (τ vs. $\dot{\gamma}$), mientras que en la Curva de Viscosidad se representa la viscosidad en función de la velocidad de deformación (μ vs. $\dot{\gamma}$). Para un fluido newtoniano se obtienen las siguientes curvas (figura 6):

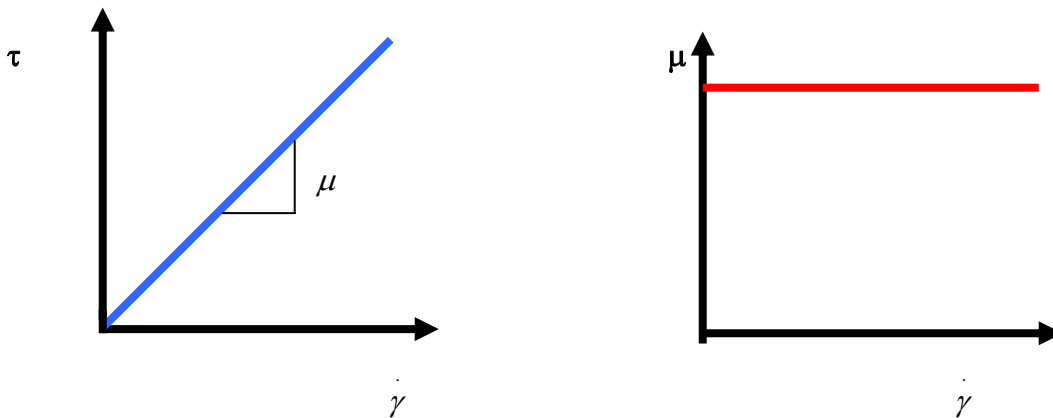


Figura 6: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido Newtoniano.

Como se puede observar en la curva de fluidez, el valor de la viscosidad μ es la tangente del ángulo que forman el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación, la cual es constante para cualquier valor aplicado. Además se observa en la curva de viscosidad, esta es constante para cualquier velocidad de deformación aplicada.

1.10 Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos son aquellos en los que la relación entre esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. Estos fluidos a su vez se diferencian en *dependientes e independientes del tiempo*.

1.11 Reología

La Reología es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos. Su estudio es esencial en muchas industrias, incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, tintas de impresión, detergentes y aceites lubricantes [18].

Algunas de sus aplicaciones son las siguientes:

- a) Producción de pegamentos: el estudio de su plasticidad, de la forma de fluir dentro del recipiente que la contiene, entre otras [17].
- b) Producción de pinturas: una pintura debe ser esparcida de forma fácil pero sin que se escurra.
- c) Producción de productos cosméticos y de higiene corporal: la duración de una laca sobre el pelo, la distribución de la pasta de dientes por toda la boca, la forma de cómo se esparce una crema, etc. Todas estas características se estudian con la reología para obtener la mayor eficacia del producto.

CAPITULO 2

En este capítulo se mencionan algunos otros trabajos que se han realizado y que están enfocados al tema de la presente tesis, y en base a esos estudios se especifican los objetivos tanto experimentales como de análisis que se llevarán a cabo.

MEZCLADO EN TANQUES AGITADOS

2.1 Mezclado

El mezclado es una de las operaciones unitarias de la ingeniería química más difíciles de someter a un análisis científico. En particular, el mezclado de fluidos es un proceso importante en industrias, naturaleza y vida diaria, además de que muchas operaciones industriales dependen de una agitación y de un mezclado eficaz. Hasta el presente no se ha desarrollado ninguna fórmula o ecuación aplicable al cálculo de la eficiencia del mezclado, o la velocidad con que se realiza, a determinadas condiciones [18].

Los primeros estudios sistemáticos sobre esta operación comienzan en los años 80 cuando se observa un incremento en publicaciones debido al análisis sobre el impacto económico, que por su importancia, tiene el proceso de mezclado, cuyos costos vistos en una escala nacional, son considerables. Para dar una idea de esta escala, en el foro Norteamericano de Mezclado de la AIChE (American Institute of Chemical Engineers) científicos de universidades e industrias estimaron que tan sólo en la industria química de ese país, las pérdidas asociadas a problemas de mezclado eran del orden de 1 a 10 millones de dólares por año. En México no existen datos ni estimaciones similares, pero la situación no es diferente, aunque si la escala económica [18].

Generalmente, el proceso de mezclado y algunas operaciones químicas son llevadas a cabo en el dispositivo más simple e importante de la industria química,

el tanque agitado. Los tanques típicos de agitación son cilindros verticales y de sección circular, los cuales son utilizados con mayor frecuencia en mezclado a comparación de los tanques rectangulares utilizados en la extracción de líquidos. Los líquidos generalmente se mantienen a una profundidad de uno a dos diámetros del tanque. El tanque agitado (fig. 7) es utilizado en una gran variedad de industrias y su popularidad se debe, en parte, a su versatilidad y economía, pues ofrece una gran variedad de tamaños, diseños de impulsores, configuraciones de mamparas o deflectores y distintas capacidades volumétricas. Lamentablemente, el tanque agitado tiene también sus limitaciones dentro de la práctica, debido a las interferencias muy difíciles de evaluar como corrientes transversales, corrientes parásitas que se establecen, (incluso en mezclas de plásticos y sólidos) dentro del recipiente.

Como parte de los problemas observados, se tiene que el análisis del equipo ya existente es difícil debido a que los equipos se encuentran poco o nada instrumentados por lo que un sobrediseño difícilmente se detecta y solo se llega a notar una deficiencia en el mezclado pues resulta obvio en un producto insatisfactorio. El problema por el desconocimiento del sobrediseño no es menos importante en términos de costos de capital y de operación [4].



Fig. 7. Tanque agitado típico

Una de las dificultades que aparece a la hora de caracterizar la mezcla y agitación, es la gran cantidad de sustancias (líquidos y/o sólidos) que se pueden encontrar en la industria química. Por lo tanto, el diseño y la optimización de agitadores están confiados en gran medida, a la experimentación [18].

Se debe distinguir entre agitación y mezcla:

Agitación se puede definir como el movimiento circulatorio inducido a un fluido dentro de un contenedor, fundamentalmente de forma circular y provocando vórtices. El objeto de la agitación puede ser incrementar la transferencia de calor en el fluido o incrementar el transporte de materia. En contraste, **mezclar** es obtener una distribución espacialmente homogénea de dos o más fases

inicialmente separadas. Aquí, una de las fases ha de ser un fluido, mientras que la otra puede ser algo tan variado como otro fluido, partículas sólidas o burbujas.

En la práctica, el diseño de la agitación ha de atender a dos factores: el grado de homogeneidad y el tiempo de mezcla. Dado que el resultado de la mezcla nunca es perfecto, el grado de homogeneidad depende de la calidad deseada en el producto final. Finalmente, la potencia requerida en la agitación depende de estos dos factores, así como del rendimiento [20].

Los problemas más serios se encuentran en los tipos de fluido que se mezclará. En la mayoría de los procesos industriales de mezclado de fluidos, la viscosidad es considerada como la propiedad más importante y es una práctica común clasificar a los fluidos en dos categorías: fluidos de alta y fluidos de baja viscosidad. En el caso de fluidos de alta viscosidad es donde el tanque agitado tiene sus limitaciones. En estudios anteriores se ha demostrado que para fluidos de números de Reynolds menores a 500 o fluidos altamente viscosos, el proceso no es tan eficiente debido a que se forman las llamadas cavernas o zonas bien mezcladas en la cercanía del impulsor mientras el resto del fluido permanece estático (regiones segregadas). Lo que estas regiones provocan es un mezclado ineficiente que, eventualmente, aumenta tanto el tiempo de mezclado como la cantidad de subproductos generados en operaciones industriales y la potencia suministrada, que en conjunto, son reflejados en los costos de operación [9].

Un parámetro que debe ser tomado en cuenta para el proceso es la selección adecuada del impulsor que dependen de las condiciones reológicas del material (deformación y flujo) y del régimen con que se trabaja. En la mayoría de situaciones de flujo, los regimenes pueden caracterizarse como laminar o turbulento. En tanques agitados mecánicamente, existe una región importante entre las dos, representando una transición de un régimen a otro.

Muchos de los estudios realizados en tanques agitados han utilizado impulsores clásicos como turbinas o propelas. Estos impulsores son conocidos por tener una baja eficiencia cuando son mezclados fluidos Newtonianos y no Newtonianos altamente viscosos. Para el funcionamiento óptimo en términos de mezclado, la mejor opción son los impulsores grandes cuyo diseño permiten flujo tanto axial como radial. Los agitadores helicoidales pertenecen a esa categoría, cuando se muestran esos fluidos complejos, los agitadores helicoidales requieren un tiempo de mezclado mas corto comparados con los impulsores “pequeños” como las turbinas o propelas, aunque su mayor desventaja es que su consumo de potencia es significativamente mayor [3].

La búsqueda de nuevos y mejores métodos que nos permitan hacer un uso eficiente de los recursos con que se cuenta siempre han generado inquietud, por ello, lo que se pretende con este trabajo es encontrar la posición adecuada para el impulsor o turbina (para el presente trabajo fue utilizado la **turbina Rushton**), lo cual de una mayor eficiencia en la operación de mezclado. Por lo tanto, el encontrar la posición más adecuada en la que se debe de ubicar la turbina hablando en términos generales como axial y radial con respecto al tanque de agitación podrá dar mejorar la operación en condiciones de agitación moderadas, lo cual dará un alto beneficio para la mayoría de las aplicaciones industriales.

El objetivo es por lo tanto que a posiciones excéntricas de una turbina dentro del tanque de agitación con velocidades moderadas se evite la formación de pseudocavernas o zonas no mezcladas en el proceso de mezclado, es decir que estas se desvanezcan gradualmente, esto observando el patrón de flujo para su estudio y corroboración de escala laboratorio a escala industrial.

Se han realizado estudios con técnicas que no han favorecido la interpretación de los patrones de flujo así como sus campos de velocidades [12], como es el caso de la técnica basada en una color-decoloración por medio de una reacción ácido-base, la cual no muestra como tal el patrón de flujo de las fluidos, sin embargo, su

funcionalidad ha sido aplicada en el cálculo de los tamaños de las cavernas lo cual ha sido referido en estudios realizados en 1996 [12] como se muestra en la figura. 8. En este estudio se muestra que las islas del fluido no mezclado, en tanque agitado pueden ser eliminadas mediante la imposición de perturbaciones dinámicas bajo el concepto de mezclado caótico.

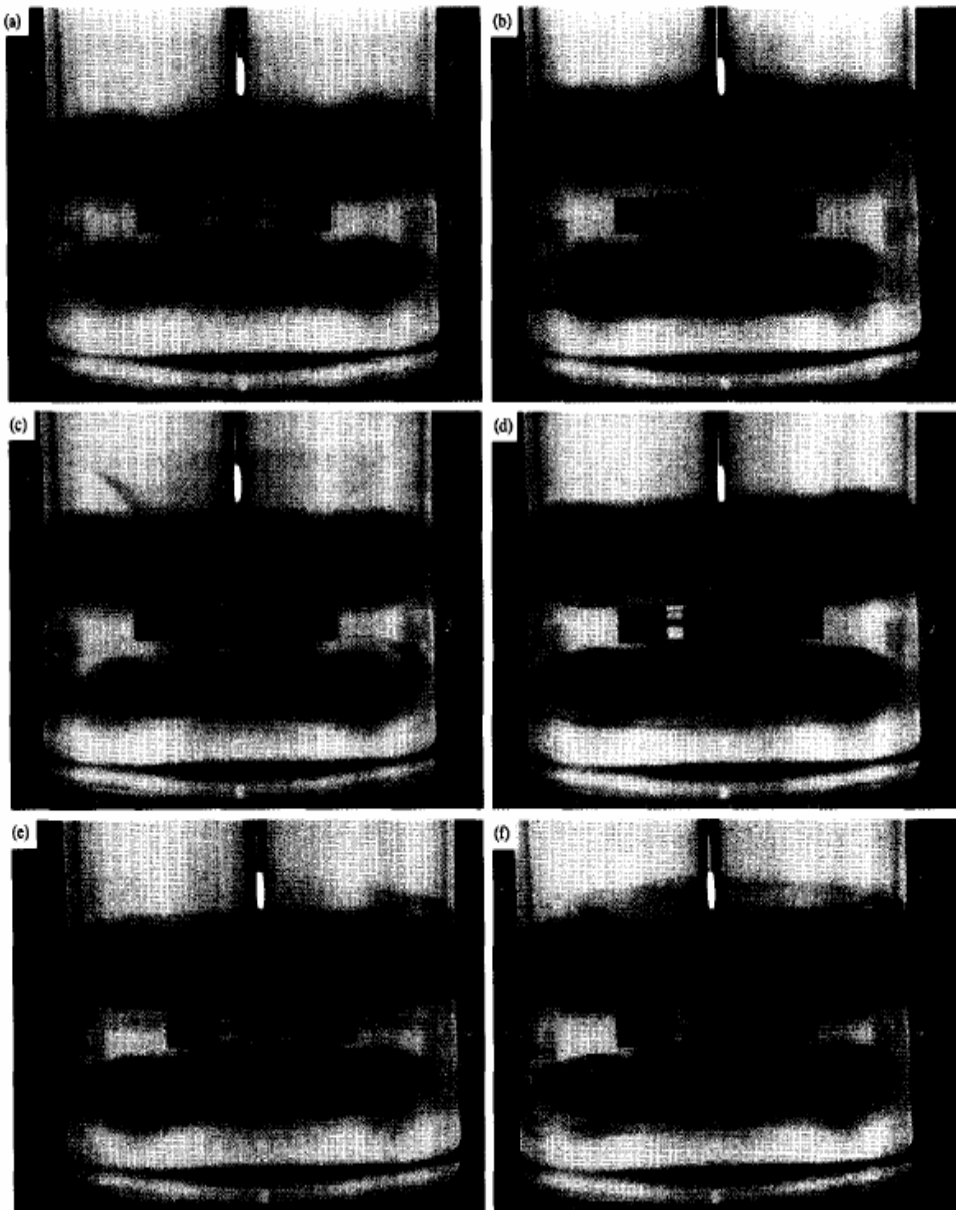


Fig. 8. Mezclado en tanque agitado.. a) las regiones segregadas son evidentes después de un mezclado a 100 rpm por 30.5 min; b) mezclado a 10 s; c) mezclado a 20 s y d) 30 s. Después de que la velocidad del impulsor ha sido reducida a 50 rpm. E) mezclado a 10s y f) 20 s.

Otros estudios, usan la Fluorescencia Inducida por láser, pero a una microescala, para modelar los fenómenos de transporte que un fluido experimenta al ser expuesto a diferentes perturbaciones dinámicas [10], como se observa en la figura 9.

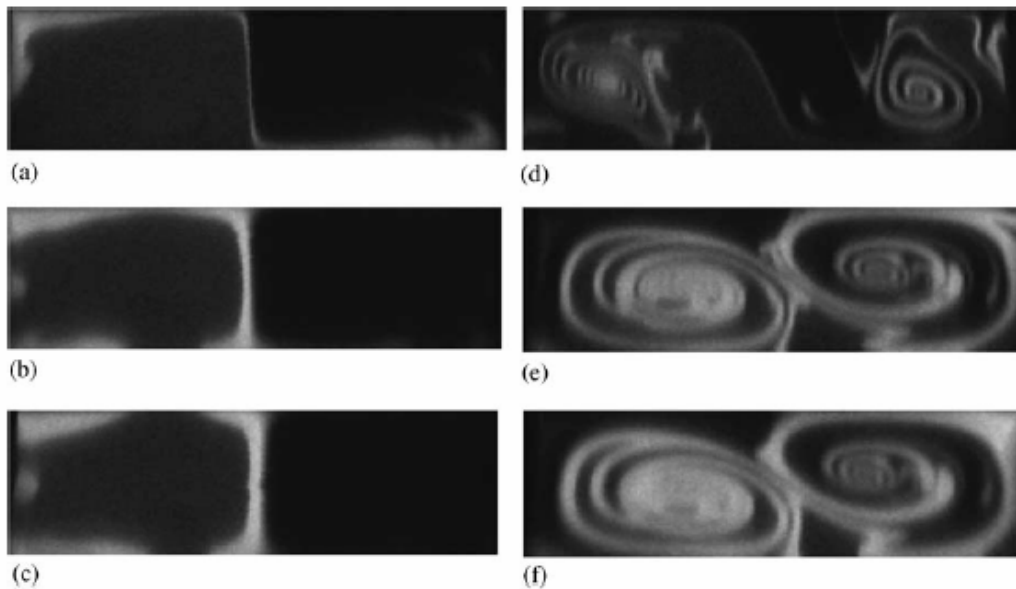


Fig. 9. Sistema HCl + NaOH para diferentes Reynolds. Columna izquierda $Re=150$ y columna derecha $Re=250$ y diferentes posiciones a lo largo del agitador a) $z= 500 \mu m$, b) $z= 5000 \mu m$, c) $z= 10\ 000 \mu m$ y d) $z= 500 \mu m$, e) $z= 5000 \mu m$, f) $z= 10\ 000 \mu m$ (geometría del micro-mezclado $600 \times 300 \times 270 \mu m$)

Un estudio más en el que se muestra la forma experimental con velocimetría de partículas para obtener el campo de velocidad de las partículas en el fluido, que en este caso, son burbujas en un tanque que contiene agua. Allí se muestra como se obtiene un campo de velocidades y direcciones por el método que se maneja en velocimetría de partículas que es el de correlación cruzada [14], indicado en la figura 10.

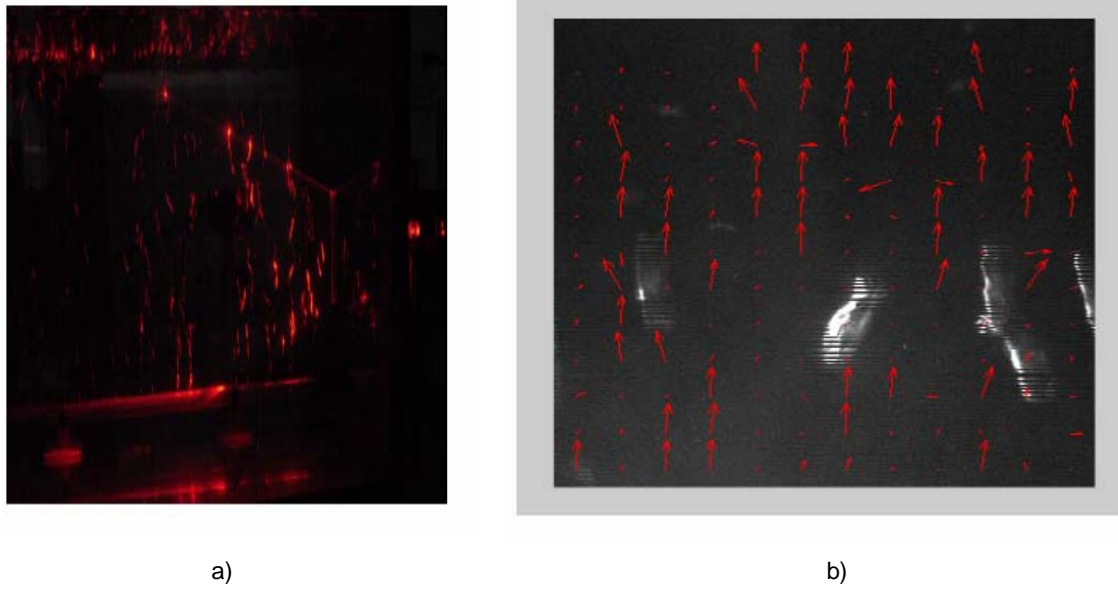


Fig. 10. Velocimetría de partículas de correlación cruzada. a) Los puntos rojos son las burbujas que pasan a través del abanico del láser; b) imagen correlacionada, por medio de vectores se representa la velocidad y dirección de las burbujas.

Los trabajos publicados, no solo se basan en técnicas como las que se mostraron, a éstas además de aplicarlas para el estudio de los fluidos, también se aumentan variables para explicar fenómenos más complejos y con más modificaciones en el desarrollo experimental. Tal es el caso de Mavros (2001) quien emplea diferentes técnicas para visualizar los patrones de flujo de un fluido y concluye que estas dan gran información acerca del comportamiento visual del fluido [15].

Existen otros casos en los cuales no solo es tomada en cuenta la técnica para explicar el comportamiento del fluido, sino que también se hacen cambios en algunos parámetros experimentales como es el caso del cambio de agitadores, el aumento de los mismos dentro del tanque, o combinación de espas en el mismo agitador. Tal es el caso de Álvarez et al. (2002), quienes hacen una comparación de diferentes experimentos combinando las espas de los agitadores y observando los tiempos de mezclado [2], Álvarez comprueba que el proceso del mezclado es ineficiente ya que no se alcanza el grado de homogeneidad deseado. (figura. 11).

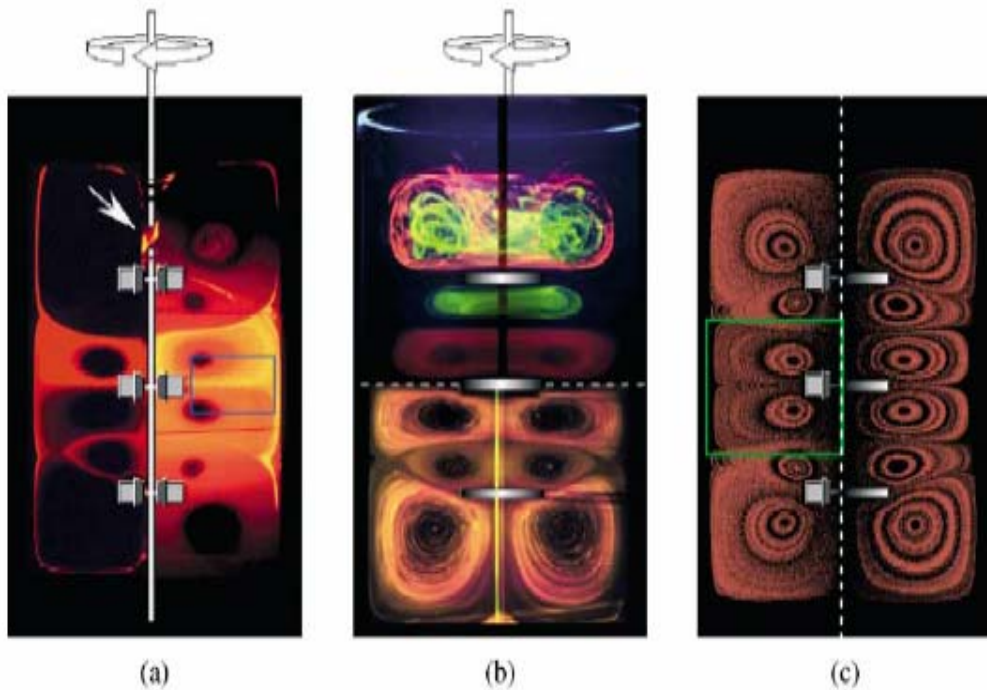


Fig.11. Proceso de mezclado. a) Experimento con agitadores; b) Experimento con discos y c) Experimentos con la combinación de agitadores y discos

Otros investigadores, llevaron a cabo un estudio experimental sobre el desempeño de un sistema de mezclado compuesto por dos agitadores excéntricos operados independientemente. Estos autores encontraron que, tanto los compartimentos de flujo como las regiones segregadas, pueden ser eliminadas, con lo cual los tiempos de mezclado y consumo de potencia pueden ser drásticamente reducidos 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 la turbina de dispersión y un agitador de bombeo (propela) [4].

A diferencia de lo expuesto anteriormente y de muchas otras investigaciones que se han realizado, el actual trabajo de tesis conjunta los conocimientos para poder llevar a cabo tanto técnicas como diseños experimentales y acercarse más (visualmente) a lo que llamaríamos un mejor mezclado, tomando en cuenta

variables de diseño de los equipos que llevan a cabo esta operación unitaria, así como la energía consumida por dicha operación.

La presente tesis se llevó a cabo mediante técnicas como: Fluorescencia Inducida por Láser (LIF) y velocimetría de la partícula (PIV), la distinción del campo de velocidades, así como el patrón de flujo del fluido en estudio.

Uno de los objetivos principales es mejorar la calidad del mezclado por medio de la excentricidad de la turbina en sentido radial dentro del tanque de agitación.

Por medio de la experimentación a las condiciones excéntricas, se buscó la mejoría de mezclado, esto implica una disminución en costo de la operación de mezclado con una mejora en la eficiencia alentadora para el sector industrial.

CAPITULO 3

En este capítulo se describen tanto las técnicas que fueron empleadas como las condiciones de trabajo para realizar cada uno de los experimentos.

MÉTODOS Y MATERIALES

3.1 Arreglo experimental.

La figura 12 muestra el arreglo experimental que fue utilizado durante todas las pruebas que se hicieron para el actual trabajo de tesis. Consiste de 5 partes que son:

1.- Un tanque fabricado de policarbonato de 165 milímetros de diámetro y de 210 milímetros de altura usado como tanque de agitación y con una capacidad de aproximadamente 4 litros de solución.

2.- Una camisa cuadrada integrada al recipiente y fabricada con policarbonato. Tiene una longitud de 227 milímetros por cada lado y una altura de 210 milímetros.

3.- Un motor Baldor DC. de 186 W ($\frac{1}{4}$ hp) que esta unido a un controlador de velocidad los cuales funcionan directamente proporcional el uno del otro.

4.- Una base cuadrada de hierro que soporta al motor con 300 milímetros de cada lado y 500 milímetros de altura.

4.- Un eje rígido de acero inoxidable conectado al motor para el soporte del impulsor con 270 milímetros de largo.

5.- Una turbina Rushton utilizada como impulsor radial construida de acero inoxidable con un diámetro de 55 milímetros y 6 paletas distribuidas de igual manera sobre el diámetro de dicho impulsor.

Como accesorios que forman parte del arreglo experimental se encuentran una serie de equipos que se emplearán para visualizar el flujo en el tanque agitado como lo son:

1.- Un láser pulsado Nd:YAG con una longitud de onda de 532 nm, 120 mJ utilizado como fuente de iluminación para cada uno de los experimentos.

2.- Un tacómetro utilizado para registrar la velocidad requerida del motor la cual es medida en RPM.

3.- Una cámara digital Canon de 7 mega píxeles utilizada para fotografiar cada uno de los experimentos en los tiempos en que se logran visualizar los patrones de flujo de los fluidos, esto para el caso de la técnica de Fluorescencia Inducida por láser. Para el caso de velocimetría de partícula es una cámara Kodak Mega plus E.S. 1.0 que esta integrada al software del PIV.

El arreglo experimental descrito anteriormente fue el que más se adecuó para los experimentos realizados. Cabe resaltar que parte de ellos fue fabricado en el taller de Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) en la UNAM, las dimensiones establecidas han logrado buenos resultados en estudios anteriores

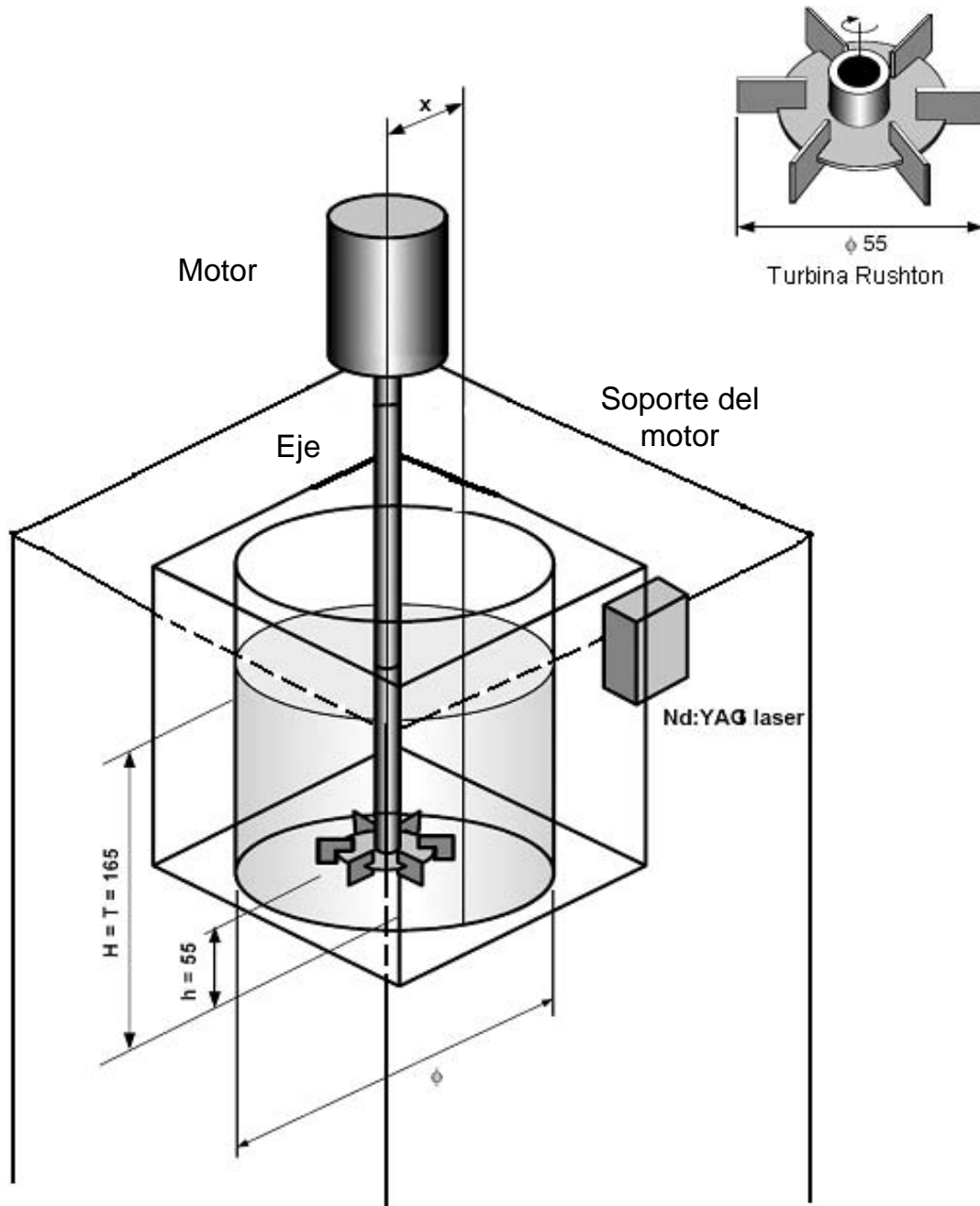


Fig. 12. Arreglo experimental (dimensiones en milímetros).

3.2 Fluidos

Dentro de este trabajo de tesis se utilizaron dos fluidos distintos los cuales fueron llevados a las dos técnicas de visualización LIF y PIV la cuales serán descritas mas adelante.

El primer fluido que se usó como materia de trabajo fueron soluciones acuosas de glucosa grado industrial a diferentes concentraciones a fin de llegar a una viscosidad cercana a la de la glicerina, esto para trabajar a las mismas condiciones con diferentes fluidos.

El otro fluido utilizado fue una solución de glicerina pura (99,5% USP), que tiene una densidad de 1250 kg/m^3 y una viscosidad de $1.41 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

3.3 Técnicas de visualización

Fueron dos las técnicas que se utilizaron para la experimentación en este trabajo. La primera fue la Fluorescencia Inducida por láser (LIF) y la segunda fue la Velocimetría de Partículas (PIV). Afortunadamente el material experimental fue el mismo, la diferencia entre ambas tecnicas es que el PIV es utilizado con un software el cual se encarga de transformar las imágenes por computadora.

3.3.1 Velocimetría de Partícula (PIV)

El análisis del campo de velocidad de un fluido en movimiento es de fundamental importancia. Uno de los métodos más utilizados para medir campos de velocidad es el conocido como velocimetría de partículas PIV (Particle Image Velocimetry por sus siglas en ingles), el cual es un método efectivo, instantáneo y no intrusivo (figura 13). Adrián (1984) iluminó un conjunto de partículas sembradas en un fluido utilizando un abanico de luz, el plano formado por la intersección del abanico

de luz y las partículas individuales, al ser fotografiado a altas velocidades, puede utilizarse para encontrar la dirección y la velocidad de estas partículas.

En la velocimetría de imagen de partículas (PIV) el movimiento del fluido se hace visible agregando partículas pequeñas para el trazo de líneas; si dos imágenes son obtenidas, con un tiempo de separación corto entre ellas, es posible deducir su velocidad en el campo de flujo.

La base inicial para una teoría de PIV fue realizada por Adrián (1988), en donde describe el valor esperado de la función de auto-correlación para una imagen PIV continua de doble exposición. Esta descripción proporcionó el marco para las reglas experimentales del diseño [14]. Más adelante la teoría fue generalizada para incluir múltiples exposiciones y análisis de correlación cruzada. La teoría proporcionó una descripción adecuada para el análisis de las imágenes con alta resolución de PIV, que era el modo de operación común para un tiempo pequeño de exposición de las imágenes. Sin embargo, el PIV es utilizado hoy en día con cámaras digitales para la grabación directa de las imágenes de las partículas. La teoría fue ampliada más a fondo por Westerweel (1993) para incluir imágenes digitales de PIV y la valoración de la dislocación en el nivel de sub-píxel.

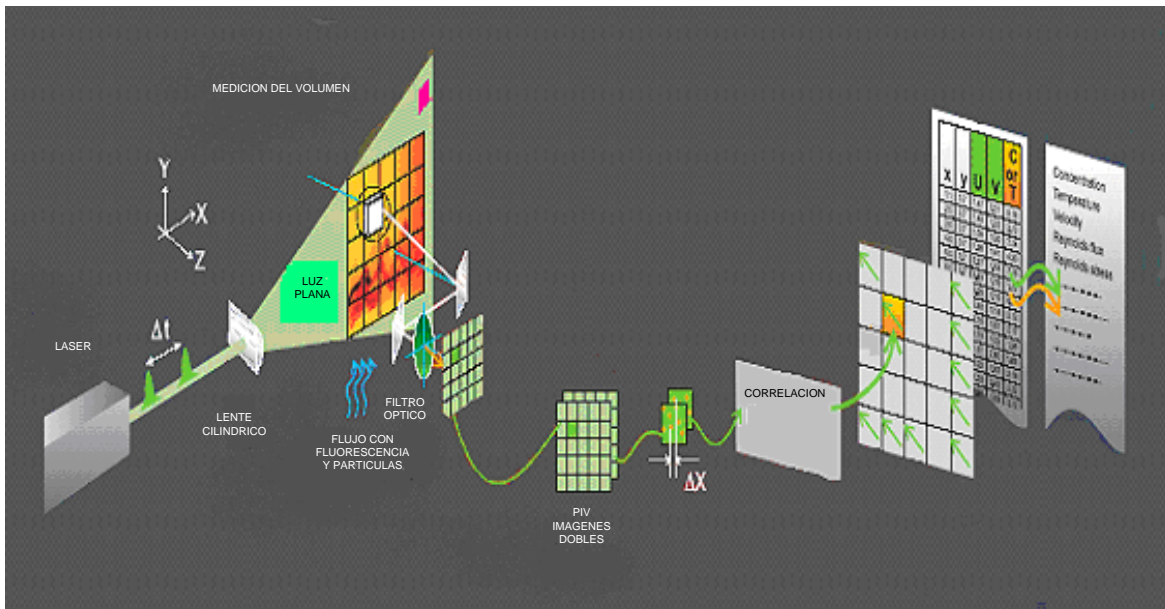


Fig. 13. Montaje experimental para PIV

3.3.2 Florescencia Inducida por Láser (LIF)

La fluorescencia inducida por láser (figura 14), es una técnica de medida óptica usada para medir la concentración instantánea de las partículas o la temperatura en un líquido. Ésta tiene aplicaciones en procesos de ingeniería (mezclado de fluidos), en procesos de ingeniería biomédica (transporte de medicamentos en flujos biológicos etc.) y en dinámica de fluidos (modelos de transferencia de calor y mezclado etc.).

Ésta es una técnica no intrusiva que además de ser cuantitativa, es precisa, ya que en combinación con las medidas de velocidad, propiedades de transporte (Número de Reynolds, coeficiente de difusión turbulenta y otros parámetros) hace que el estudio sea viable experimentalmente.

La técnica consiste en agregar una solución (para el caso de esta experimentación, la solución está constituida por el mismo líquido en estudio y una

proporción de Rodamina 590 como colorante) y exponerla al haz del láser con el que cuenta el equipo experimental hasta observar las características del patrón de flujo y la geometría que se forma al llevar a cabo la operación.

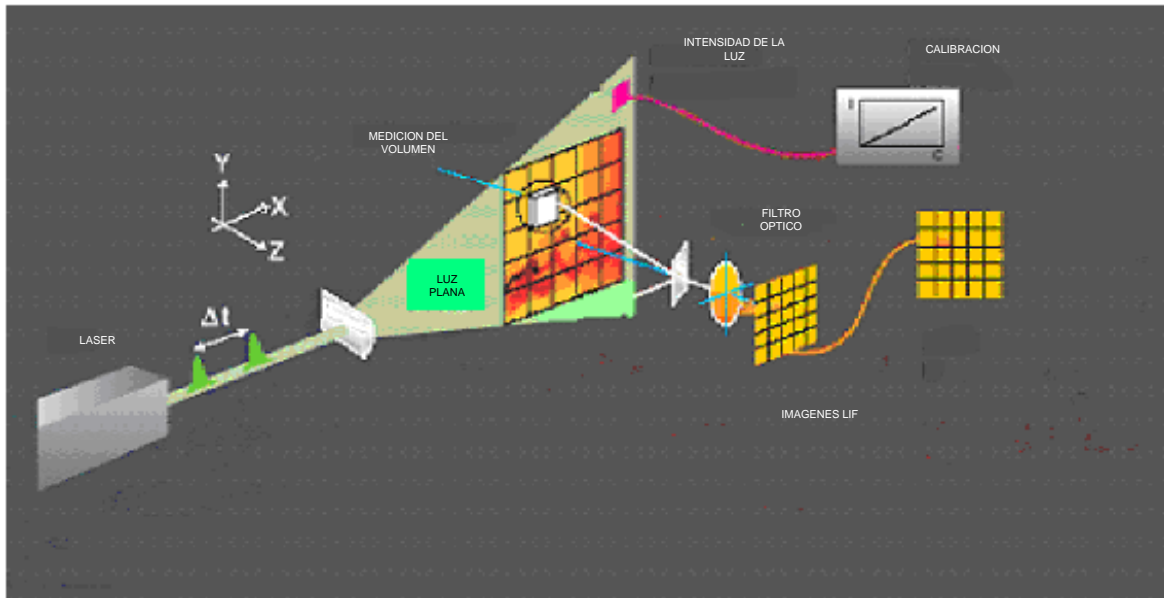


Fig. 14. Montaje experimental para LIF

3.4 Condiciones Experimentales

Fueron varios los aspectos experimentales que se tomaron en cuenta para llevar a cabo cada una de las pruebas realizadas, estas incluyen desde el equipo experimental hasta las soluciones en estudio.

Para el caso de LIF las condiciones fueron las siguientes:

- 1.- Para cada prueba se utilizó 3.5 litros de fluido, incluyendo la solución agregada dentro del tanque de mezclado.
- 2.- La solución constituida por la Rodamina 590 y el líquido en estudio estaba formada por .06 mg de Rodamina por cada 40 mililitros del líquido.

3.-El impulsor utilizado durante toda la experimentación fue una turbina Rushton y el eje de soporte para el mismo y que se encontraba conectado con el motor, con las especificaciones ya descritas; se desplazó a dos diferentes posiciones a partir del centro del tanque (0 mm, 5 mm y 20 mm) desplazándolo cada vez que se cambiaba de experimento.

4.- La posición del láser Nd:YAG con respecto al tanque de agitación era perpendicular, y estaba colocado a una distancia que se mantuvo durante todas las experimentaciones realizadas de 685 milímetros.

5.- La posición de la cámara digital Kodak Mega Plus E. S. 1.0 era de 90° con respecto al plano iluminado por el láser y estaba colocada a una distancia de 510 milímetros con respecto al tanque de agitación.

6.- La velocidad de agitación estuvo en un rango de 37 rpm, la que fue medida con el tacómetro.

7.- El tiempo de cada experimentación fue de aproximadamente 40 min tomándolo en cuenta a partir del momento en el que se agrega la solución hasta que se mantienen las condiciones de flujo estable.

Para el caso de PIV las condiciones experimentales son las siguientes:

1.- Se utilizaron los mismos 3.5 litros de fluido incluyendo la solución que se agrega con los trazadores para PIV.

2.- La solución estaba formada por 40 mililitros del líquido en estudio por cada 20 mg de partículas huecas de plata S-HGS que son las utilizadas para esta técnica como trazadores y no con colorante como es el caso de LIF.

3.- La posición del láser y la cámara Kodak Mega plus E.S- 1.0 se mantuvieron igual que en los experimentos de LIF.

3.5 Esquemas (Condiciones de Trabajo)

Usualmente, los estudios sistemáticos se han realizado con configuraciones geométricas de agitación similares y para poder hacer una comparación entre cada uno de los trabajos, estudiando los patrones de flujo o características del mezclado bajo las mismas condiciones geométricas.

En algunos estudios recientes se han modificado las variables experimentales, con el fin de obtener mejores resultados como son: Combinaciones de impulsores, aumento del número de impulsores dentro del tanque y distribuidos de diferente manera etc. [1].

El presente trabajo tiene el objetivo de observar el fenómeno del rompimiento de la simetría del sistema, mediante el desplazamiento radial de la posición estándar concéntrico al tanque en distintas posiciones de la turbina, (0 mm, 5 mm, 20mm).

La figura 15 muestra las 3 configuraciones del impulsor, en sentido axial, de tal forma que se aprecie de manera esquemática la forma en que se manipulaba la variable experimental.

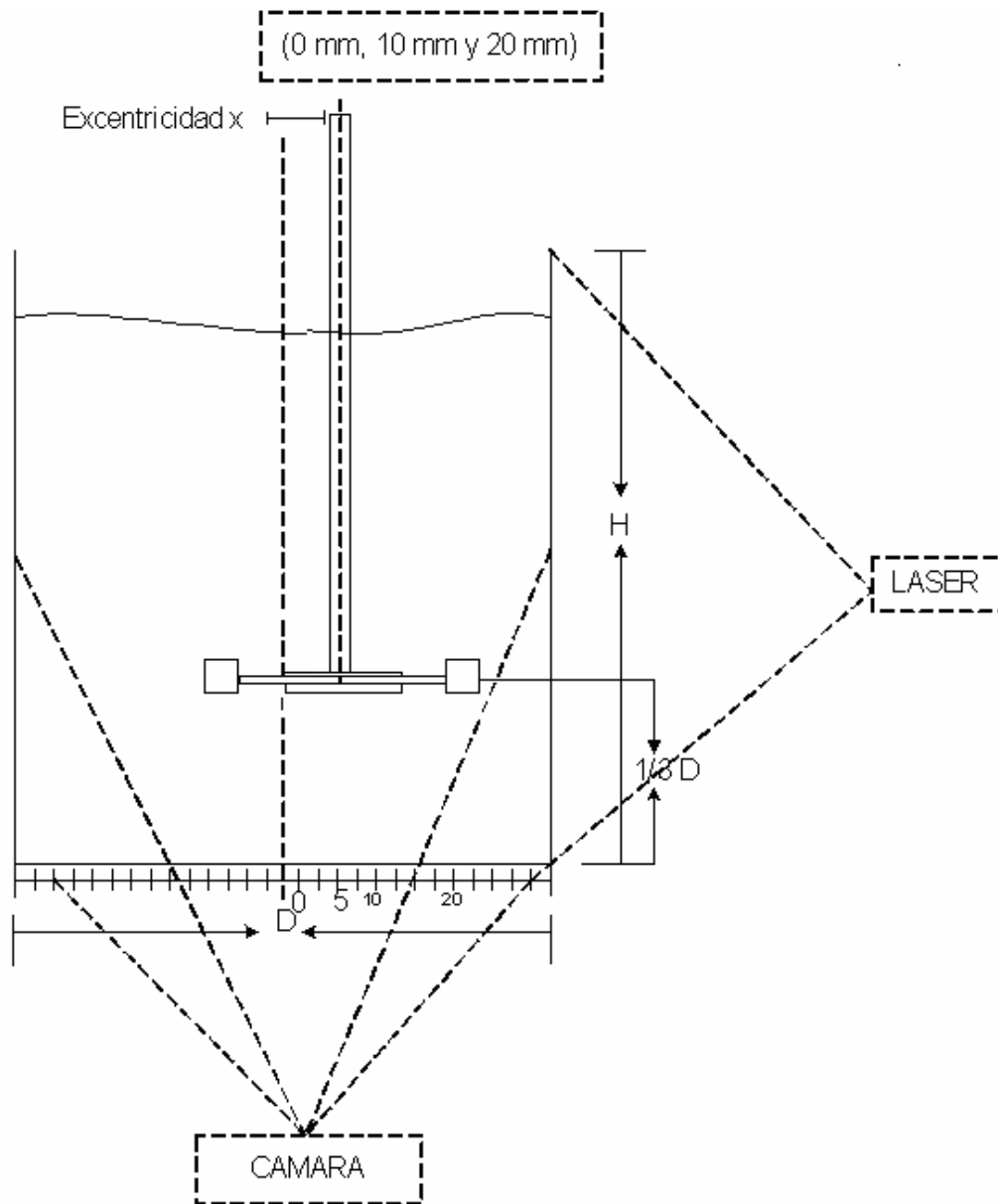


Fig. 15. Esquemas de las condiciones de trabajo.

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos empleando las dos técnicas descritas, además de que en el caso de PIV, se muestra un estudio cuantitativo que se logra mediante herramientas alternas como es el caso de MATLAB.

4.1 PRESENTACION

Los resultados que a continuación se presentan son una comparación entre las dos técnicas utilizadas (LIF y PIV).

Es importante mencionar que cada una de las dos técnicas tiene su campo de trabajo tanto cualitativo como cuantitativo.

Los resultados presentados parten de la comparación entre la turbina Rushton y la PBT (paletas inclinadas). En esta comparación se muestran las estructuras de flujo y la visualización con cada turbina.

La figura 16 muestra los patrones de flujo que se forman con una turbina tipo PBT trabajando a las siguientes condiciones: a) un rango de 37-40 rpm, b) a 5mm movida del centro del tanque experimental con la técnica LIF y c) el trazador Rodamina B utilizado en este experimento.

En esta imagen se puede observar que las cavernas que se forman a lado de la turbina PBT (izquierda-derecha) son semejantes en figura pero con diferentes dimensiones, lo cual se podría explicar mediante el efecto que da la excentricidad de la turbina, es decir, mientras mas pegada este la turbina a una pared del tanque, la caverna tendrá diferentes dimensiones en comparación con el otro lado del tanque, esto con respecto a tamaño y diámetro de la misma.

Es importante mencionar que la turbina PBT como lo muestra la imagen tiene una deficiencia en cuanto a visualización de los patrones de flujo por las siguientes razones:

- a) Es difícil analizar las estructuras formadas en el tanque cuando el mezclado ocurre rápidamente, es decir que no se llega al estado estacionario y se pierden rápidamente los patrones de flujo al no estar bien definida la geometría de las cavernas.
- b) Cuando la concentración de trazadores en el tanque no lleva un patron de flujo bien definido.

El inciso b) es visualmente explicado ya que como se puede observar en la figura las cavernas o estructuras de flujo que se presentan no están completamente definidas, es decir, que existe una concentración de trazadores que dificulta especificar en que lugar comienza y en que lugar termina la caverna.

En el caso de que se estudiaran las propiedades geométricas de los patrones de flujo estas situaciones darían dificultades para su estudio y datos erróneos por falta de exactitud.

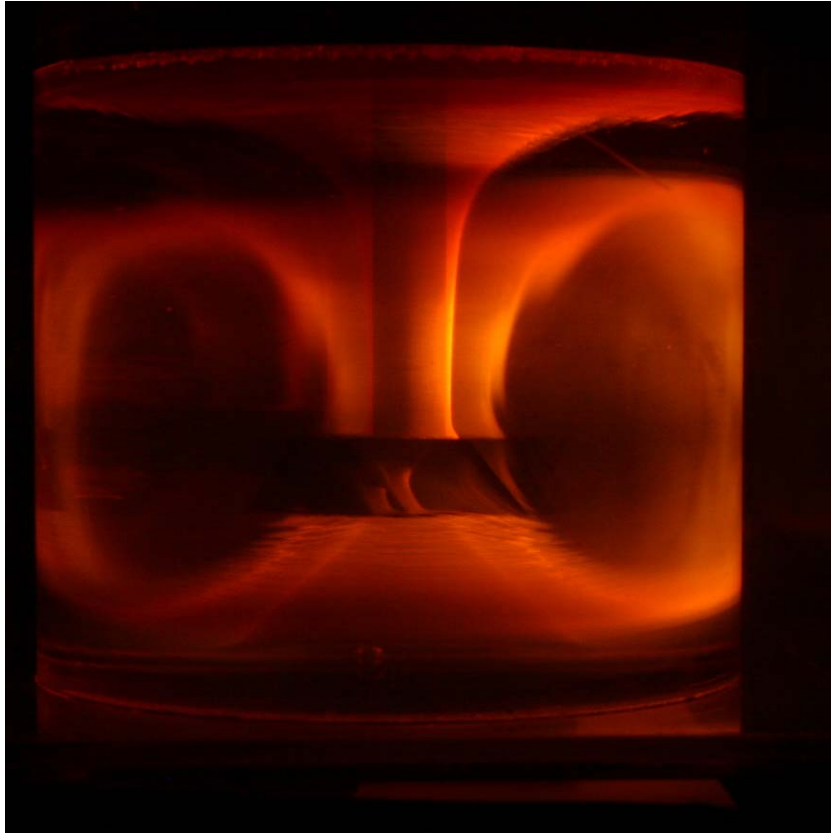


Fig. 16. Estructura de flujo formada con un impulsor PBT

La imagen que se presenta a continuación (Fig. 17), muestra los patrones de flujo en un experimento que fue realizado a las mismas condiciones que el anterior con el cual se obtuvo la imagen del impulsor PBT a excepción del trazador, que en este caso fue Rodamina 590 esto explica el cambio de color en la imagen. Cabe resaltar que la turbina en este caso es una turbina Rushton y como se puede observar la geometría de las cavernas es diferente, ya que en esta son cuatro cavernas alrededor de la turbina.

En comparación con la turbina PBT, la turbina Rushton muestra una geometría más definida a pesar de que se manejan las mismas condiciones experimentales. Es importante mencionar que en algunos de los trabajos que se han mencionado con anterioridad la turbina Rushton ha sido la de preferencia. También la elegimos

en esta tesis porque muestra una mayor definición en las estructuras de flujo visualizadas.

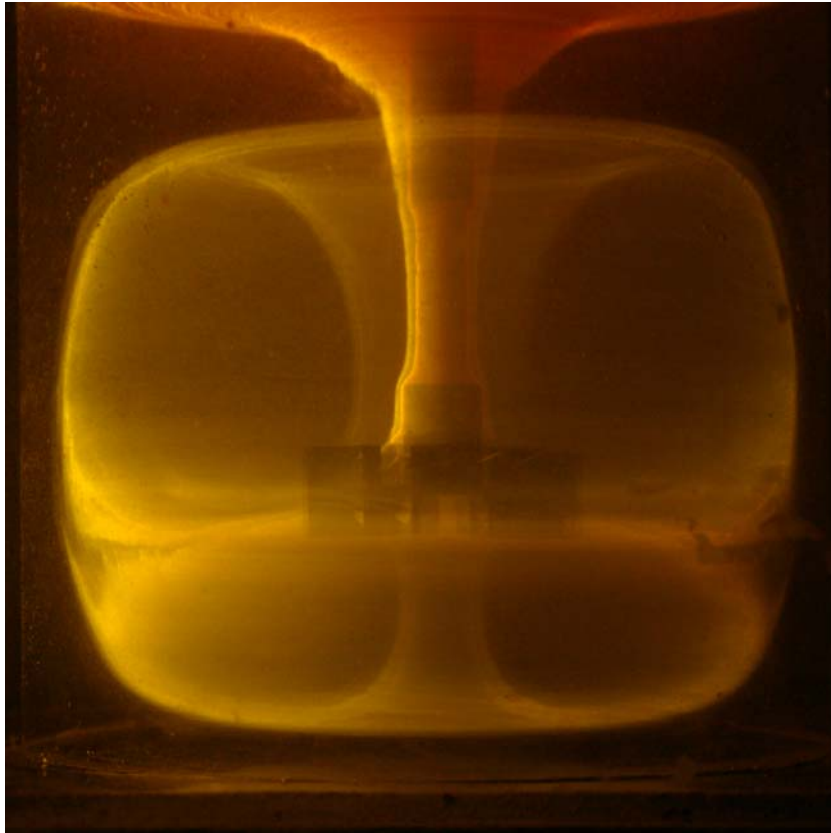


Fig. 17. Estructuras de flujo formadas con impulsor Rushton

Gracias a la definición visual de la geometría de los patrones de flujo que se muestra en las imágenes al utilizar turbinas Rushton, se podría obtener un análisis cuantitativo más preciso de estudios en comparación con la turbina PBT.

Un punto importante de mencionar es que dichos resultados pueden ser utilizados para las siguientes investigaciones, a fin de conocer algunos otros parámetros cuantitativos como la geometría y el diámetro de la caverna, ya que en ellos la información da un acercamiento real de la operación de mezclado.

4.2 Fluorescencia Inducida por Láser (LIF)

Como se mencionó anteriormente esta técnica es tanto cuantitativa como cualitativa, y por medio de ésta se pueden conocer muchas de las propiedades de transporte de un fluido como es el caso del Número de Reynolds, coeficiente de difusión turbulenta y otros parámetros [4].

La técnica se ha utilizado en diversos trabajos para conocer mediante ella, las características geométricas de regiones conocidas como cavernas [7].

No es objetivo de la presente tesis hacer un estudio numérico de dichas regiones. Lo único que se pretende es visualizar las cavernas.

Las imágenes que se presentan a continuación abarcan las mismas condiciones experimentales, es decir, misma turbina, mismo láser, mismo equipo experimental, misma velocidad etc., en realidad la diferencia entre cada uno de los experimentos se basa en la excentricidad del eje de agitación (como ya se había mencionado anteriormente).

La figura 18 muestra los patrones de flujo que se obtienen al realizar un experimento con la turbina Rushton colocada al centro de tanque cuyas condiciones son la velocidad de 37 rpm y usando la rodamina B como trazador.

En esta imagen se puede observar que la geometría de los patrones de flujo es similar en ambos lados de la turbina (izquierda-derecha, arriba-abajo), es decir que el flujo dentro del líquido se comporta similarmente en todo el tanque cuando la turbina se encuentra centrada con respecto al tanque de agitación. Se puede observar en la parte superior derecha una especie de escalones que se forman en el contorno de la caverna, esto muestra gran dificultad en el estudio ya que es solo en este lugar del tanque, a pesar de que la turbina se encuentra centrada, que se

pueden observar, dejando así un área de interés que se intentará explicar más adelante.



Fig. 18. Patrones de flujo a condiciones centradas mediante LIF

En la figura 19 se muestra una imagen a las mismas condiciones en las que se obtuvo la figura 18, pero las condiciones geométricas de la turbina son diferentes, ya que aquí la posición de la turbina está desplazada 5mm del centro del tanque de agitación.

Como se puede observar en esta figura las dimensiones de las cavernas son diferentes en comparación a las cavernas en situaciones centradas. La excentricidad del impulsor tiene un efecto en la geometría de las cavernas, es

decir que del lado hacia el cual se mueve la flecha, las cavernas se observan mas estiradas, tal como se puede observar en esta imagen.

La flecha fue movida hacia el lado derecho del tanque de agitación (visto de frente) y en éste se puede observar la geometría mas estirada (arriba-abajo). De manera similar la especie de escalones se sigue mostrando en el patrón de flujo como en las condiciones centradas, solo que a estas condiciones, existe un espaciamiento mas largo entre cada uno.



Fig. 19 Patrones de flujo a condiciones excéntricas (agitador descentrado 5mm) mediante LIF

Como se a podido observar mediante LIF, los patrones de flujo a diferentes condiciones se muestran de una manera similar con respecto a la geometría de las cavernas en todo el tanque agitado. La diferencia que se muestra a diferentes desplazamientos de la turbina consiste en las dimensiones de dichas cavernas,

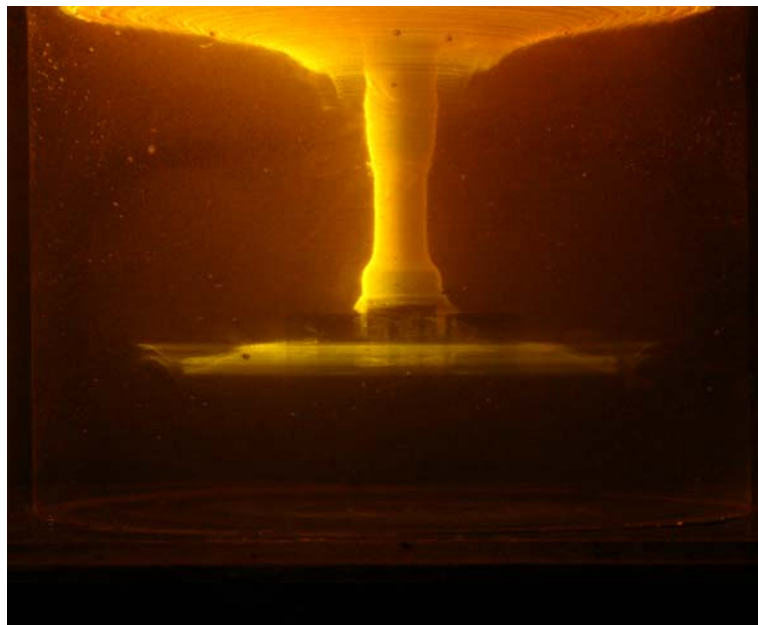
por lo cual podríamos hacer la hipótesis de que a medida que la turbina se desplace más hacia un lado del tanque la caverna, seguirá teniendo una geometría similar pero con dimensiones cada vez mas diferentes en sentido axial.

La secuencia de imágenes que se presenta a continuación son el registro de cómo es que se van formando las cavernas en todo el tanque, Fig. 20

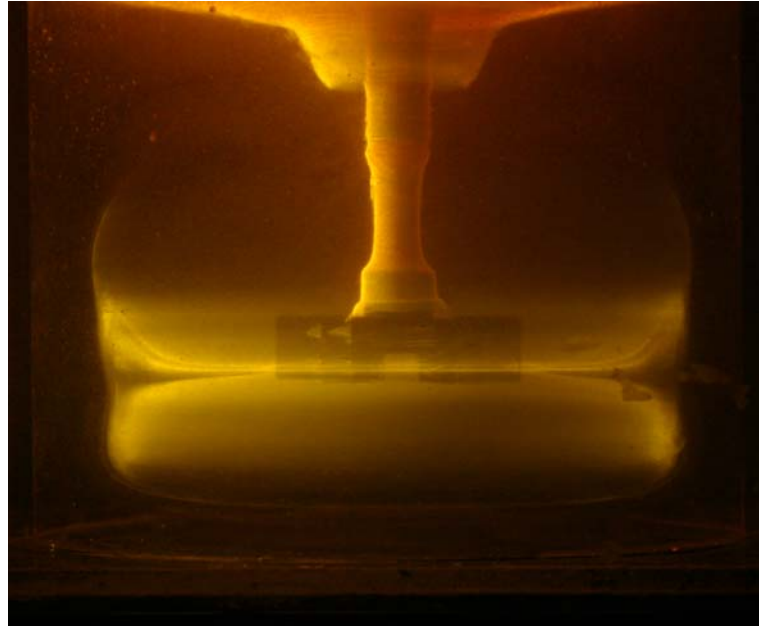
a)



b)



c)



d)

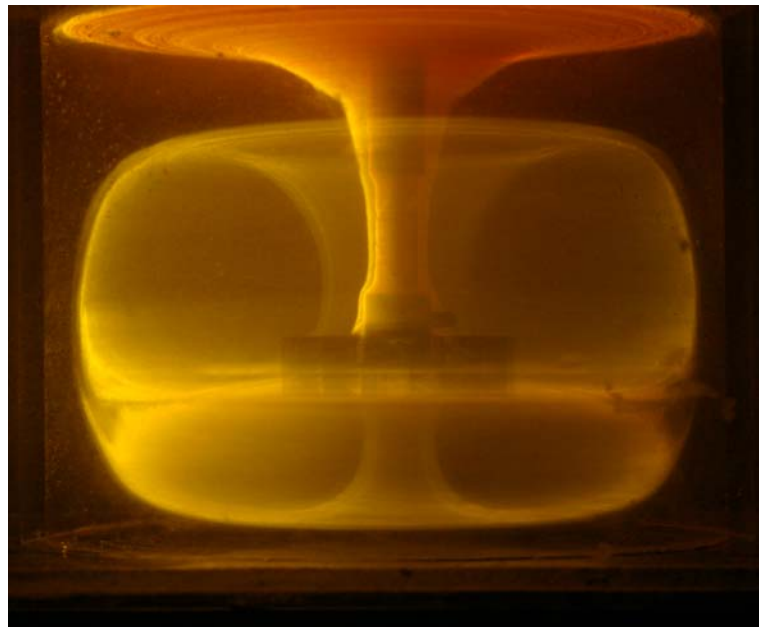


Fig. 20. Secuencia de imágenes a) $t=2$ min; b) $t=10$ min; c) $t=20$ min y d) $t=30$ min en la formación de cavernas para una turbina Rushton desplazado del centro del tanque de agitación a 5mm

La secuencia anterior muestra de una manera resumida la formación de las cuatro cavernas alrededor del impulsor en un tiempo aproximado de 40 min. Es importante saber que el tiempo en el cual se mantiene el experimento es proporcional a la velocidad de agitación. En realidad las cavernas permanecen más tiempo, pero el problema es que visualmente después de determinado tiempo es muy difícil observar los patrones de flujo digitalmente, es decir, las cámaras ya no muestran una definición de las imágenes para estudios posteriores, por lo cual se tratan de obtener imágenes antes de que eso ocurra y en ese momento el experimento se da por terminado.

4.3 Velocimetría de Partícula

La velocimetría de partícula es una técnica tanto cualitativa como cuantitativa, su estudio se basa en la trayectoria que siguen las partículas mostrando las características del flujo de fluidos.

En este trabajo de tesis se hizo un estudio tanto cuantitativo como cualitativo y que se delimitó en el momento que se obtienen datos numéricos para que en estudios posteriores se analicen de una manera más específica y se puedan obtener resultados numéricos que expliquen los patrones de flujo.

Para los siguientes resultados también fue utilizada la turbina Rushton, por los motivos ya mencionados anteriormente, y en esta técnica, solo se analizará la parte superior derecha de la turbina en el tanque y que también es el lado hacia donde se desplaza la turbina. Las condiciones experimentales fueron semejantes a LIF, esto con la finalidad de observar de una manera numérica lo que en experimentos con LIF se podía visualizar.

Los siguientes resultados tuvieron tres diferentes posiciones de la turbina (0 mm, 10 mm. y 20 mm.) tomando en cuenta que estas posiciones fueron las que

mostraron mejores resultados en cuanto a lo visual, que por lo tanto, reflejara la misma eficiencia en los resultados numéricos para un mejor estudio.

La figura 21 muestra el experimento tratado con PIV sin tratamiento numérico, en este caso la turbina esta al centro del tanque de agitación y lo que se puede observar como puntos brillantes son las partículas que siguen el patrón de flujo del fluido. En esta imagen se puede observar una “espiral” que forman las partículas, lo cual indica que flujo tiene la misma geometría que se observaba en LIF pero que además es un flujo continuo que rodea a la turbina.

Un punto importante, es que desgraciadamente en aspectos visuales las imágenes solo muestran dos dimensiones de lo que es el patrón de flujo, lo cual delimita el aspecto visual tomando en cuenta que el patrón de flujo tiene un comportamiento mas complejo.

Como se puede observar en este tipo de técnica, es que a diferencia de LIF, que sólo mostraba, por el color de los trazadores, el contorno de la caverna y que gradualmente se perdía por cuestiones de homogeneidad en la solución, el PIV muestra las características del flujo siguiendo el patrón de la caverna completa.

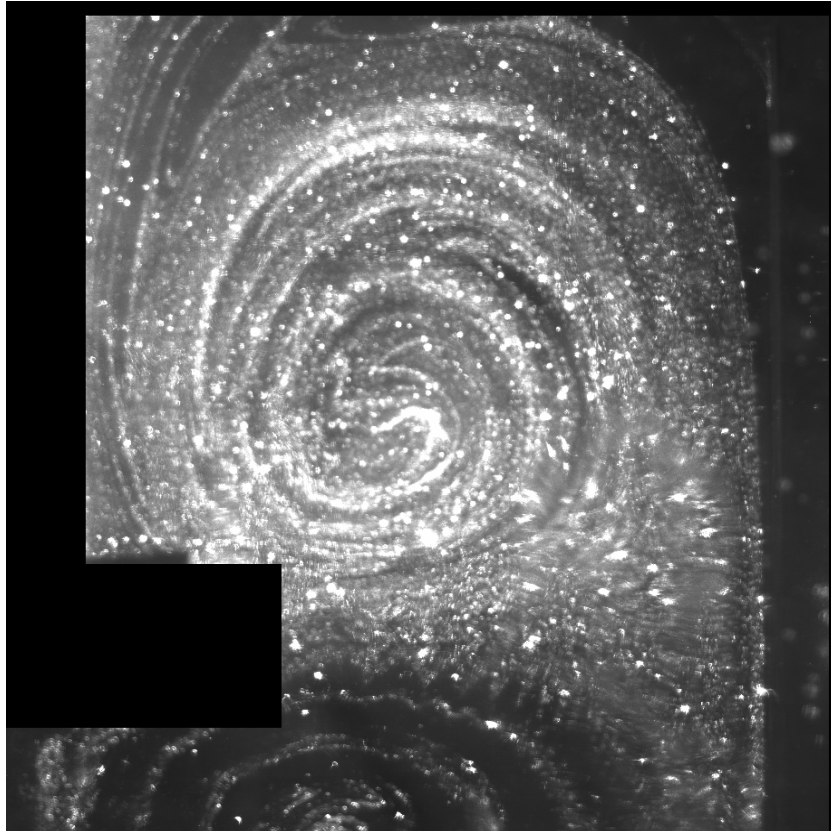


Fig. 21. patrón de flujo a condiciones centradas y sin tratar con PIV

La figura 22 representa pro medio de vectores las partículas que se observan visualmente en la figura 21. Esta figura muestra la conversión de datos numéricos que se obtienen de PIV y que se manipulan con un programa hecho en MATLAB el cual convierte las posiciones y velocidades de cada una de las partículas que se encuentran en el área de interrogación (en este caso la parte del tanque que se observa) en vectores puntuales, y de esta manera el estudio sea cuantitativo además de cualitativo.

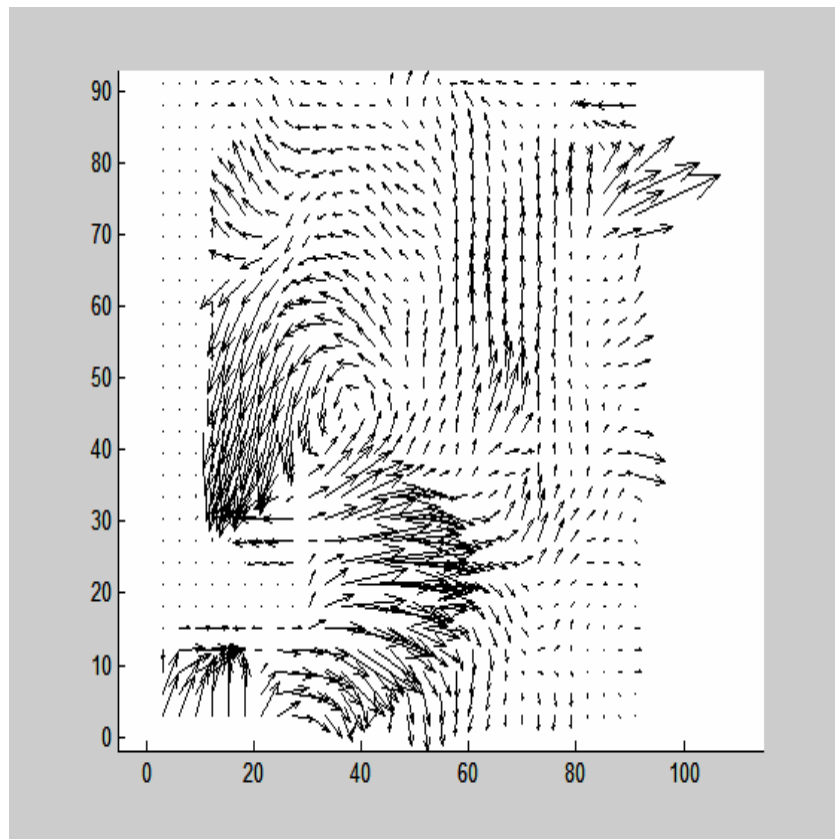


Fig. 22. Imagen tratada con MATLAB para el caso centrado con PIV.

La figura 23 muestra la geometría de los patrones de flujo que se forman sobre el líquido en las condiciones ya mencionadas con turbina Rushton, pero a 10 mm desplazada del centro del tanque de agitación. En esta imagen se puede ver como es que la geometría es diferente a la de la geometría centrada.

Como ya se había observado en LIF, PIV también muestra el tipo de escalones que se forman sobre el contorno de la caverna y que se forman cerca de la flecha. Esta espiral muestra como es el caso de condiciones centradas que una vez más por cuestiones de dimensionamiento nos limita el aspecto visual, en cuanto a lo que se podría observar desde otras posiciones del tanque, pensando que si se observara en todo el tanque es una especie de dona lo que rodea a la turbina.

Es importante mencionar que a condiciones excéntricas con respecto al tanque de agitación también se puede observar una especie de aglomeración de partículas en la parte superior del tanque y alrededor de la flecha. Este tipo de fenómenos no es captado con alta definición digitalmente pero a simple vista en este vórtice también se forma una especie de espiral pero muy separado del área de contacto con la turbina. Este tipo de fenómenos no se observan en condiciones centradas.

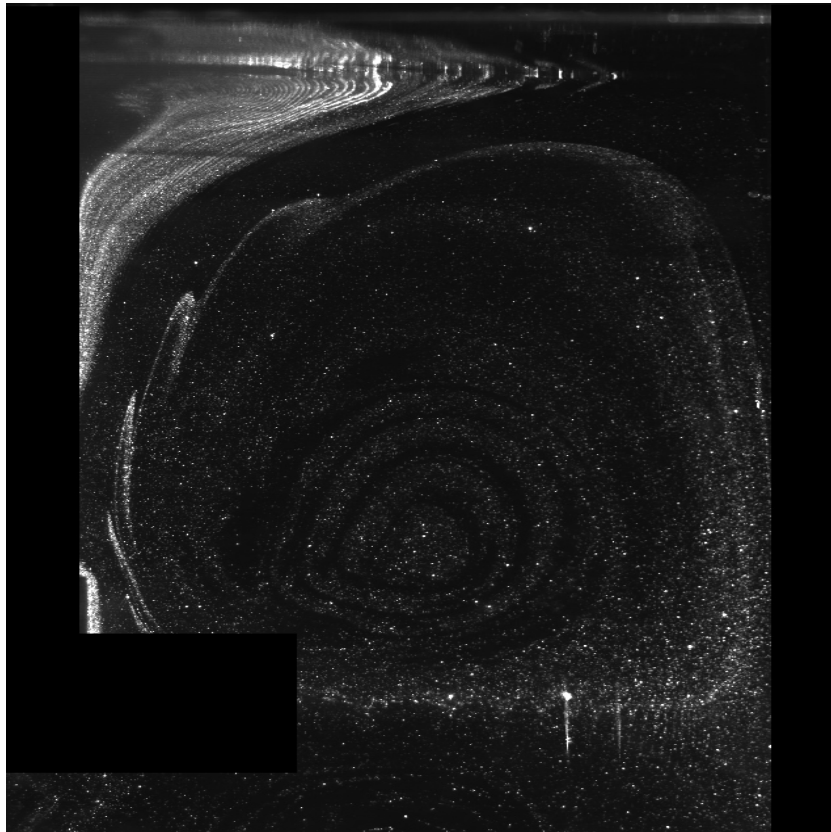


Fig. 23. patrón de flujo observado con PIV con la turbina excéntrica a 10 mm.

La Figura 24 es el tratamiento de PIV en MATLAB, el cual muestra las partículas que se observan en forma de vectores para su posterior tratamiento.

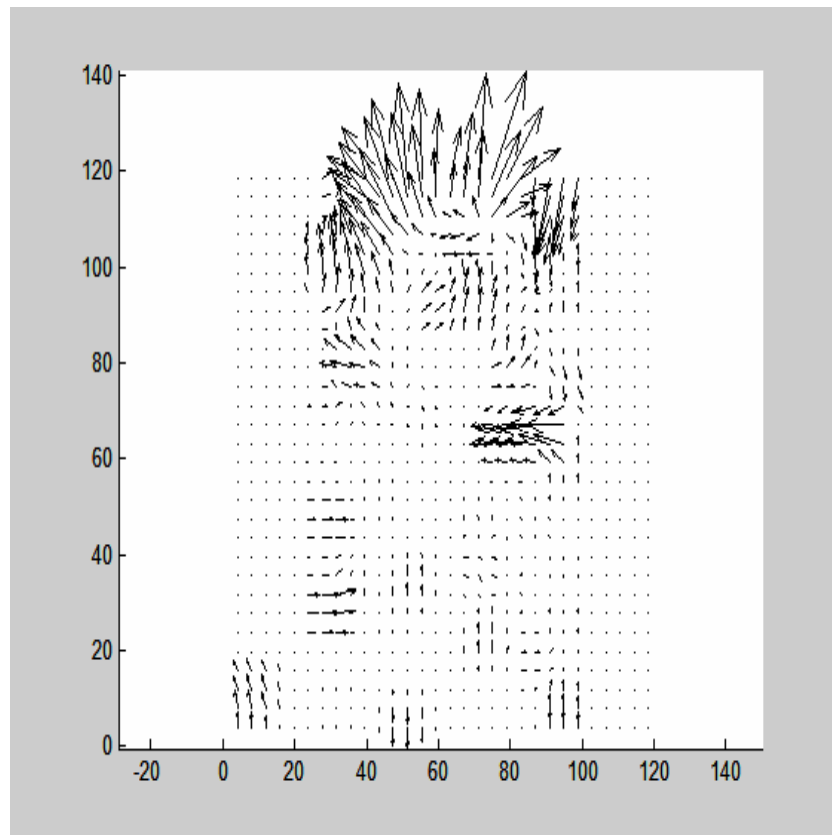


Fig.24. Imagen tratada con MATLAB para el caso donde la turbina se desplaza 10 mm.

La figura 25 muestra la imagen de los patrones de flujo con turbina Rushton a condiciones excéntricas con respecto al tanque de agitación pero esta vez a 20 mm desplazado del centro del tanque de agitación y a condiciones ya mencionadas.

Es esta imagen se puede observar como es que la caverna adquiere una geometría más estirada con respecto a la geometría centrada, una vez más se observa la espiral que predomina en este tipo de técnicas y además, se observan también los escalones junto a la flecha de agitación, que como lo había mostrado LIF es proporcional a que mientras más cerca esté de la pared del tanque los escalones estarán más separados entre si. A estas condiciones también se encuentra el pequeño vortice pegado a la flecha de agitación con el mismo comportamiento que en las condiciones de 10 mm.

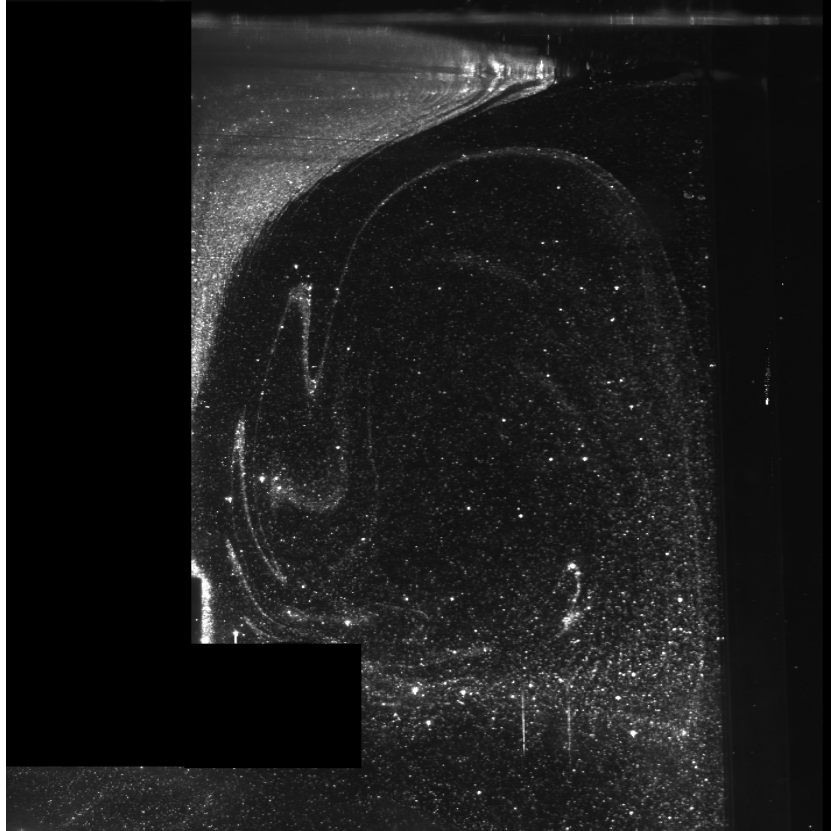


Fig. 25. Patrón de flujo observado con PIV con la turbina excéntrica a 20 mm.

La figura 26 es la que representa el tratamiento de PIV con MATLAB y que describe el patrón de flujo que se obtiene al realizar la parte visual.

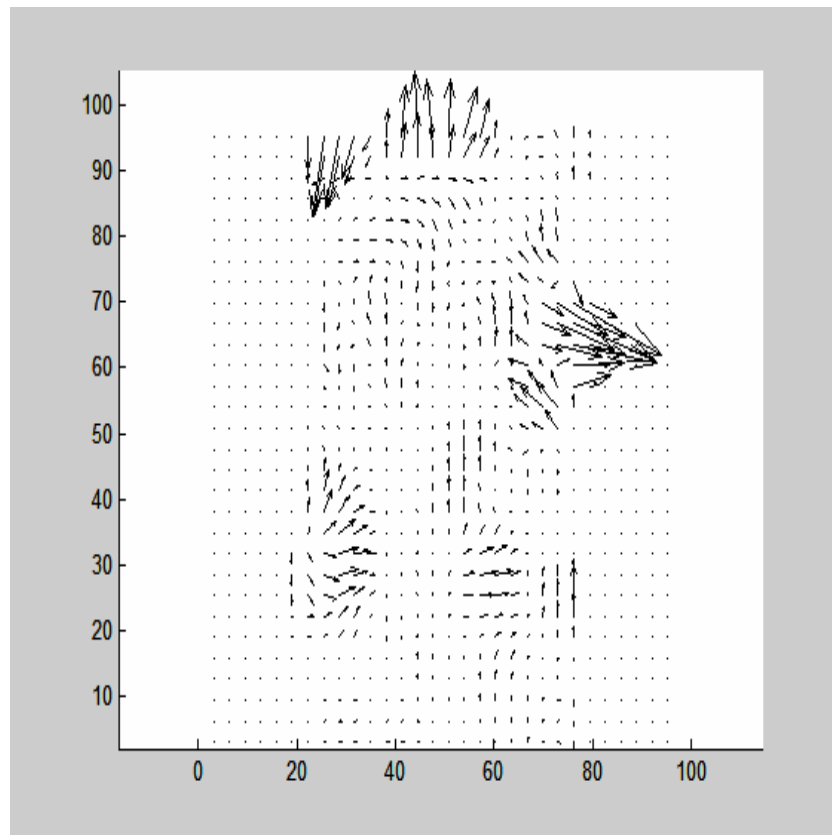
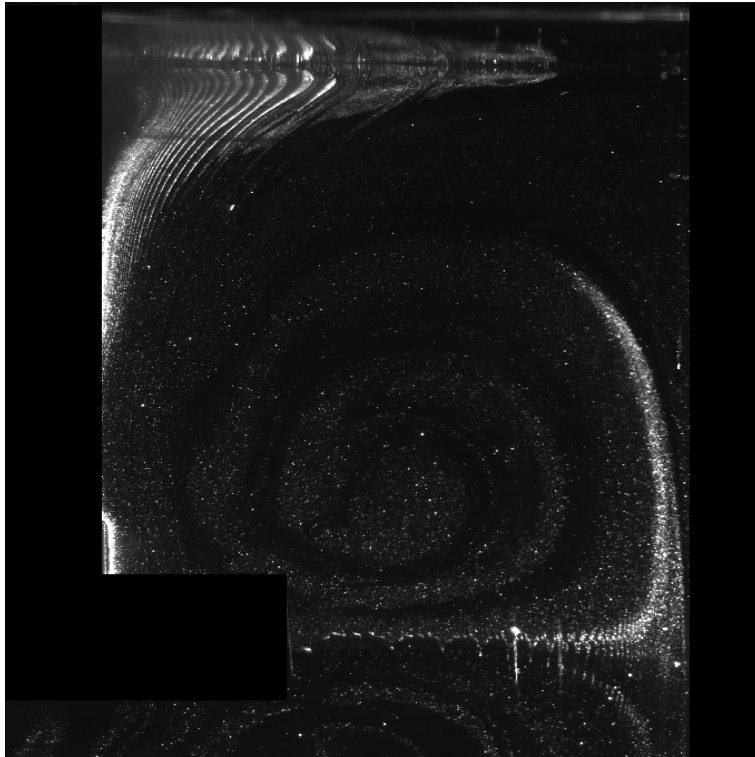


Fig. 26. Imagen tratada con MATLAB para el caso donde la turbina se desplaza 20 mm.

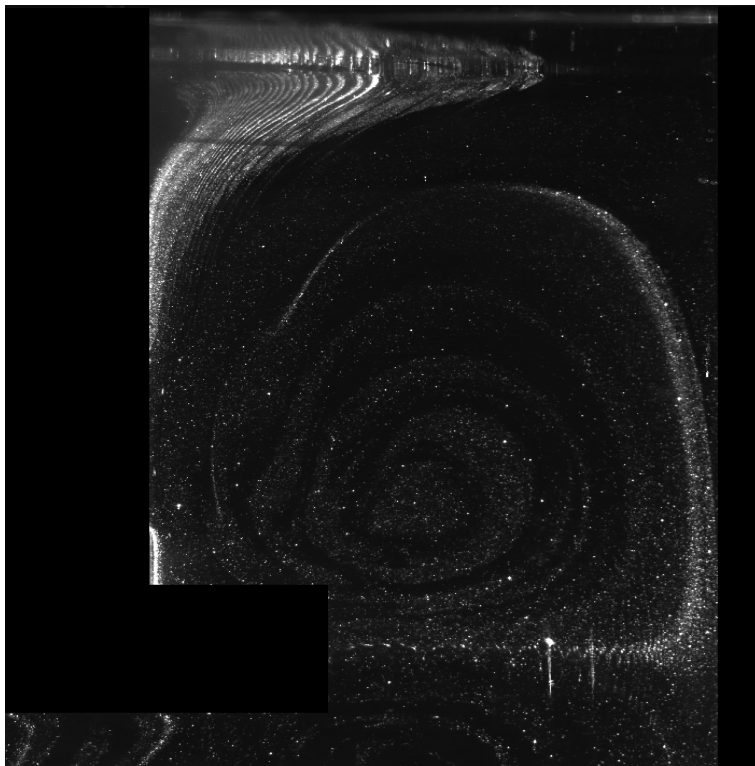
Mediante estos datos tanto cualitativos como cuantitativos, podemos conocer tanto la velocidad con que se lleva a cabo el mezclado hasta el momento en que se llega a una homogeneidad y además hipotéticamente podríamos obtener el tiempo en el que el mezclado se vuelve caótico sin mencionar mucha más información que en teoría del mezclado se puede obtener para describir la operación y que en estudios posteriores podría complementar la investigación.

El siguiente grupo de imágenes en la figura 27 muestra una secuencia de la formación de las cavernas con la técnica PIV.

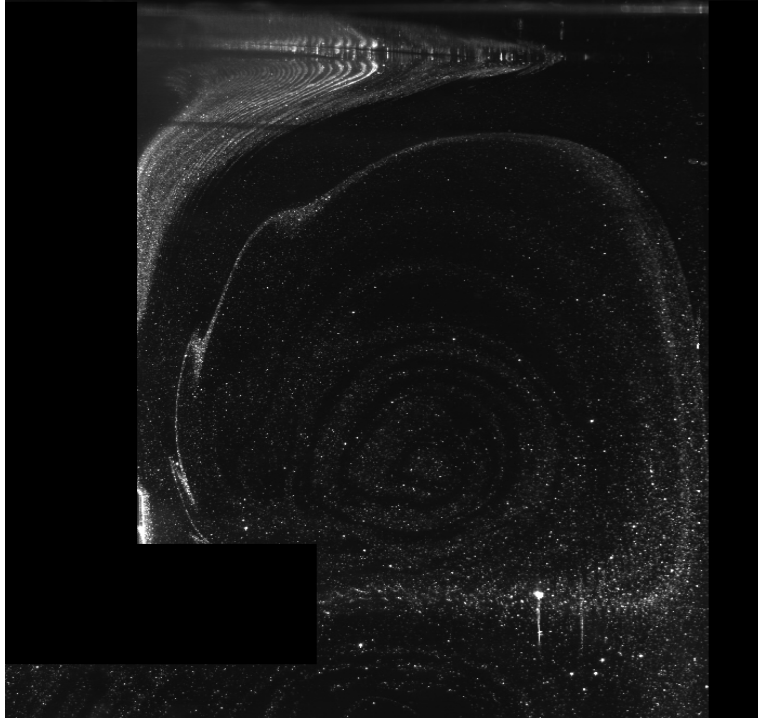
a)



b)



c)



d)

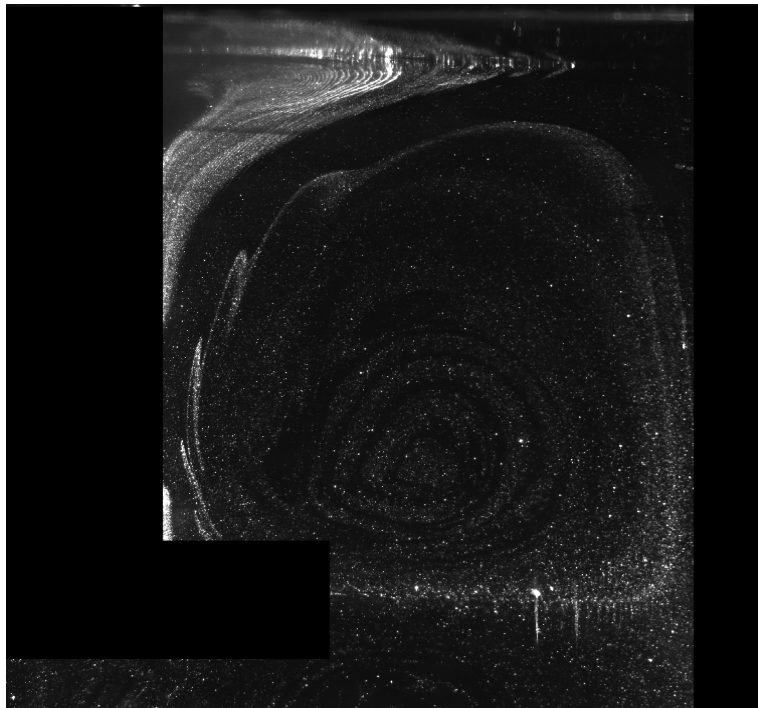


Fig. 27. Patrón de flujo observado con PIV. a) $t=5$ min; b) $t=15$ min; c) $t=25$ min y d) $t=35$ min. (secuencia de formación de la caverna).

CAPITULO 5

En este capítulo se muestra un análisis de las partículas que siguen el patrón de flujo del fluido, además del estudio de una partícula tomada cerca del impulsor para observar su comportamiento en uno de los experimentos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los datos que la técnica PIV ha arrojado en forma de tablas así como la información de cada una de las partículas que están presentes en la imagen han sido de gran ayuda para estudiar el fenómeno que ocurre en cada uno de los experimentos que se han mostrado.

Es importante mencionar que los datos numéricos proporcionan la posición de cada una de las partículas en los ejes X e Y, así como las velocidades en los mismos ejes. De estos datos se partirá para estudiar el efecto hidrodinámico en las partículas y por lo tanto en la geometría y patrón de flujo.

En esta parte, se analizará el comportamiento de una partícula en específico en el tiempo, es decir, a lo largo de una serie de imágenes que cubre aproximadamente $1 \frac{1}{2}$ de vueltas del impulsor en 10 segundos.

A título de ejemplo, en la Figura 28 se muestra un perfil de velocidades. Es importante hacer notar que en dicho perfil hay puntos particulares que permiten llevar a cabo un análisis más profundo de la hidrodinámica en el tanque agitado. Uno de esos puntos es el llamado punto silla, en el cual se presenta divergencia de los vectores velocidad, es decir a partir de este punto las partículas tomarán rutas diferentes.

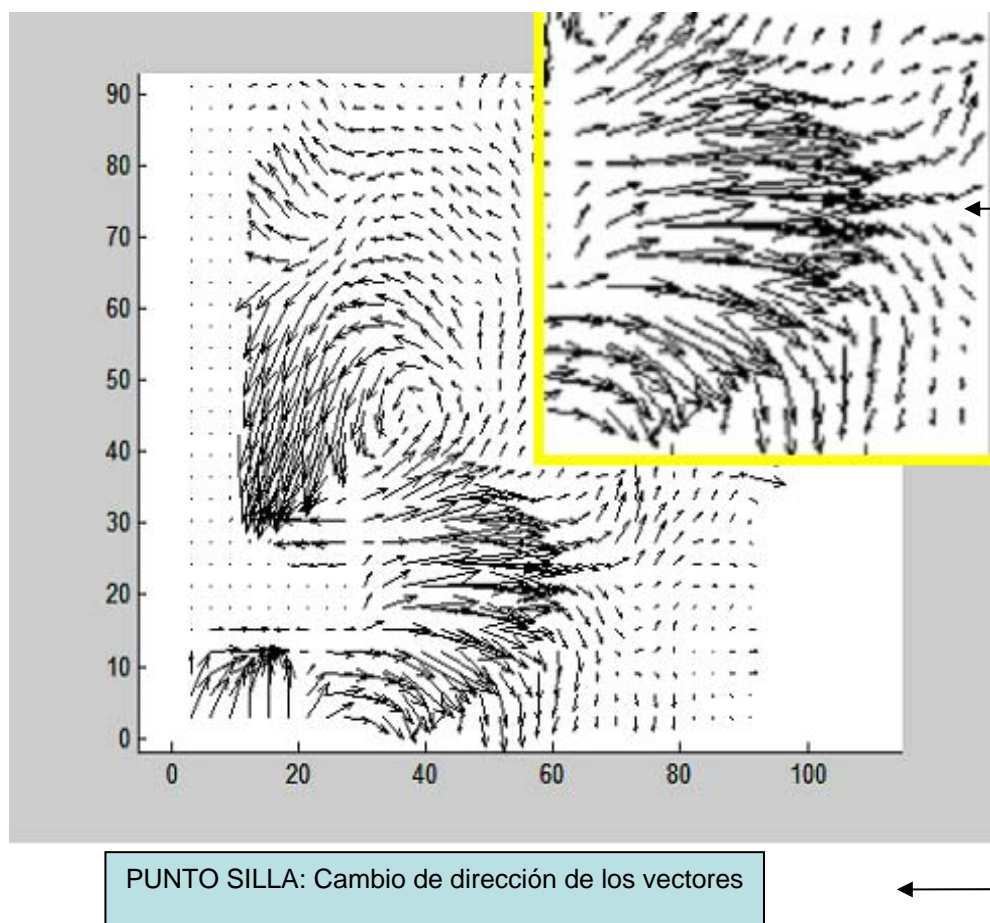


Fig. 28. Acercamiento del efecto, punto silla.

En la figura 28, se muestra este cambio de dirección por la flecha de cada vector. Numéricamente esto se representa mediante el cambio de signo en la columna de velocidades y experimentalmente respecto a lo visual, por la formación de cada pseudocaverna arriba y debajo de la turbina.

Un estudio más detallado de este tipo de comportamiento lo da el seguimiento de una partícula ubicada en esta posición específica. El análisis que se hace en esta tesis es tomando en cuenta los siguientes puntos:

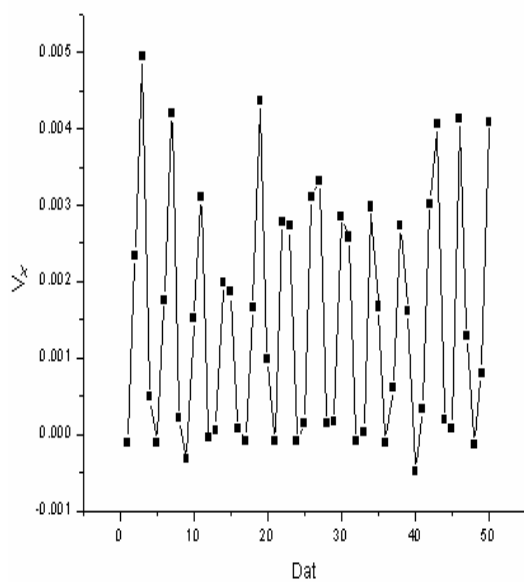
- a) Se localiza una partícula que se encuentra dentro del rango en que se observa el fenómeno de punto silla.

- b) Se localizan sus posiciones y velocidades en cada una de las imágenes obtenidas mediante el tratamiento de MATLAB.
- c) Se grafican velocidades en X e Y durante el tiempo en que se obtuvieron imágenes, es decir durante 10 segundos.
- d) Por último se grafica la velocidad absoluta en este mismo tiempo, la cual se define por:

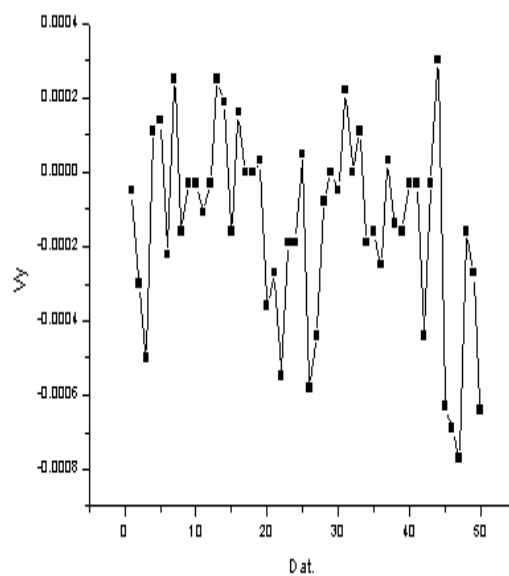
$$v = \sqrt{(V_x^2 + V_y^2)} \text{-----}(3)$$

Las gráficas siguientes muestran el tratamiento de una sola partícula que se encuentra en el punto silla. Para estas gráficas solo se tomaron los datos en donde el impulsor se encuentra centrado y a 20 mm con respecto al centro del tanque de agitación, ya que estos fueron los resultados más representativos para el análisis de la partícula.

a)



b)



c)

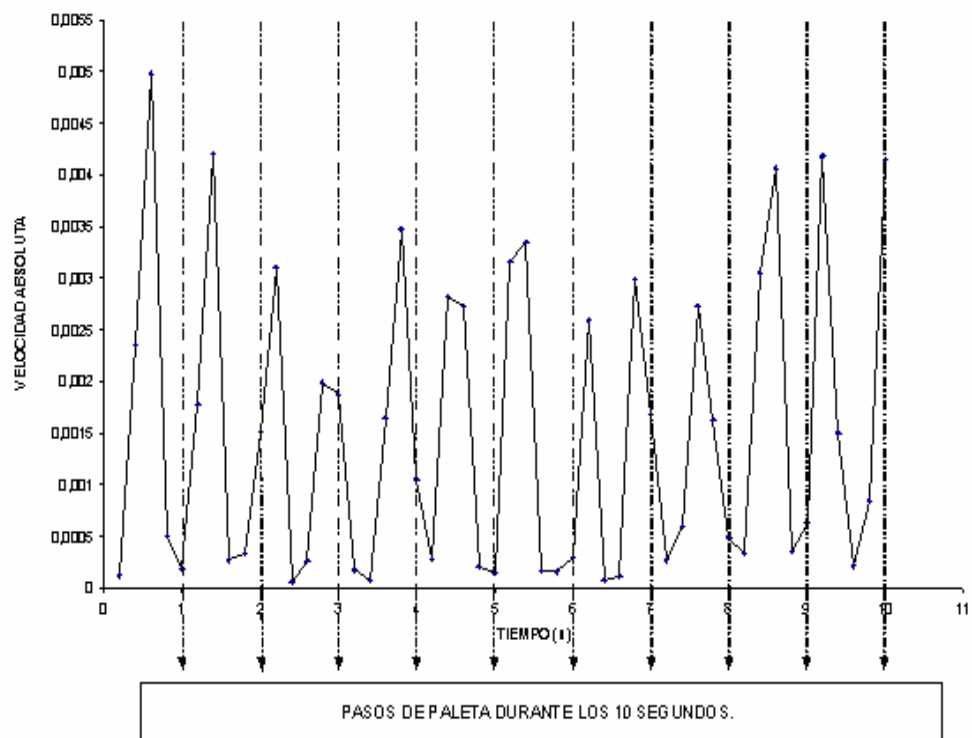


Fig. 29. Gráficas representativas de la velocidad de una partícula, para la turbina centrada, donde: a) movimiento sobre el eje X; b) movimiento sobre el eje Y y c) Velocidad absoluta de la partícula.

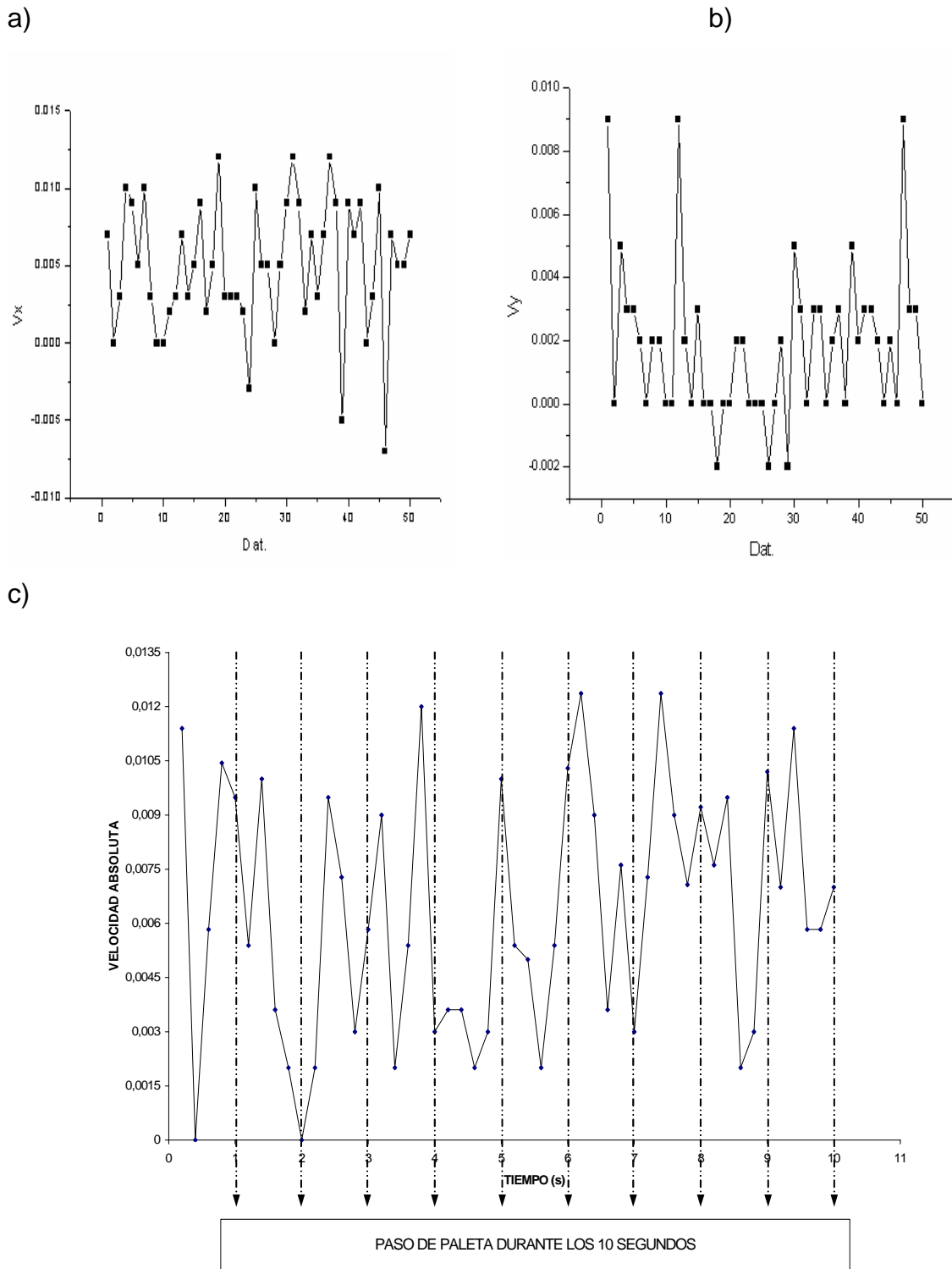


Fig. 30. Gráficas representativas de la velocidad de una partícula para la turbina desplazada 20 mm, donde: a) movimiento sobre el eje X; b) movimiento sobre el eje Y y c) Velocidad absoluta de la partícula.

Como se puede ver, el comportamiento de la partícula tomada es sinusoidal irregular, es decir, que la partícula tiene un aumento y disminución de la velocidad durante todo el proceso de mezclado alrededor de la turbina sin importar la posición de la turbina en el tanque.

Más específicamente, el acercamiento a la turbina nos da la siguiente información:

- a) La turbina cuenta con seis paletas y las mediciones que se hicieron mediante un video que recrea las imágenes muestra el paso de diez paletas en diez segundos, es decir aproximadamente vuelta y media de la turbina.
- b) Las paletas están distribuidas angularmente cada 60° . En el presente caso se considera la posición inicial ($\theta = 0^\circ$) en el momento que inicialmente la paleta es percibida y ($\theta = 60^\circ$) cuando aparece la siguiente paleta.
- c) En ese rango las velocidades de la turbina varían, es decir, que la mayor velocidad registrada se muestra al paso de cada una de las paletas y las velocidades menores están entre las paletas que hacen los 60° .

CONCLUSIONES

En esta tesis se llevó a cabo un estudio de la hidrodinámica en tanques agitados mecánicamente en condiciones de flujo estable e inestable, con especial énfasis a la visualización de patrones de flujo. En primer término se analizó el caso de flujo estable con el agitador descentrado. En ambos casos el agitador giró en un solo sentido. Para visualizar el flujo se emplearon las técnicas de fluorescencia inducida por láser (LIF) y velocimetría de partículas (PIV)

En cuanto a la comparación de las dos técnicas (LIF y PIV) ambas son de gran ayuda visual y muestran de una forma eficiente la geometría de las estructuras que se forman en un tanque agitado; sin embargo la técnica PIV resulta aún mejor cuando es llevada de lo cualitativo a lo cuantitativo con diferentes herramientas como lo fue MATLAB, ya que ésta describe el fenómeno de una manera numérica y mejor representada en un área con dimensiones bien definidas lo cual aumenta la capacidad de estudio de los patrones de flujo de un fluido.

Como es de observar en esta tesis y como se mencionó como el objetivo principal, los casos excéntricos de la turbina en el tanque agitado muestran una mayor eficiencia en la operación de mezclado, es decir, mientras mayor era la excentricidad radial, las estructuras iban perdiendo estabilidad y se podía observar el fenómeno de estiramiento, doblamiento y rompimiento de las cadenas de fluido, lo cual induce al flujo caótico y que es la característica de la eficiencia de la operación de mezclado [2].

Por lo anteriormente expuesto desde el punto de vista visual y analítico se ha llegado a obtener una ventaja con respecto a muchos otros estudios, y esto se refleja en aspectos importantes como el tiempo de mezclado que se liga directamente con la cantidad de energía requerida para llevar a cabo la operación y por lo tanto la disminución en el costo de dicha operación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Alvarez-Hernández M. M; Shinbrot T; Zalc J; Muzzio F. J. (2002). Practical chaotic mixing. Chem. Eng. Sci. 3749-3753.
- [2]. Aref, H. Stirring by chaotic advection. Journal of fluid mechanic. Vo. 43, (1984), 1-21.
- [3]. Arratia P. E; Kukura J; Lacombe J. and Muzzio F.J. (2006). Mixing of Shear-Thinning Fluids with Yield Stress in Stirred Tanks. AIChE Journal, Vol. 52, No. 7, 2310-2322.
- [4]. Ascanio G; Brito-Bazán M; Brito-De La Fuente E; Pierre j. Carreau and Tanguy P. A. (2002) Unconventional Configuration Studies to Improve Mixing Times in Stirred Tanks. Can. J. Chem. Eng. Vol. 80 No.558-565.
- [5]. Brito de la Fuente, E, Leuliet, J,C, Choplin, L. and Tanguy, R. A. Mixing and circulation times in rheologically complex fluids. Institution of Chemical Engineerings. No. 121
- [6]. Chung K.H.K; Barigou M; Simmons M.J.H. (2006). Reconstruction of 3-D flow field inside miniature stirred vessels using a 2-D PIV technique, 12th European Conference on Mixing, Bologna, 27-30.
- [7]. Diez F.J; L. P. Bernal, G.M. Faeth. (2005). PLIF and PIV measurements of the self-preserving structure of steady round buoyant turbulent plumes in crossflow. Heat and Fluid Flow. 873-882.
- [8].- Edward L. Paul, Atiemo-Obeng Victor A; M. Kresta Suzanne. (2004) Handbook of industrial mixing. Wiley-Interscience.
- [9]. Foucault S; Ascanio G; and. Tanguy P.A. (2006). Mixing Times in Coaxial Mixers with Newtonian an Non-newtonian Fluids. Ind. Eng. Chem. Vol. 45, No. 1,352-359.
- [11]. Hoffmann Marko, Schlüter Michael and Rábiger Norbet. (2005). Experimental investigation of liquid-liquid mixing in T-shaped micro-mixers using μ -LIF and μ -PIV. Institute of Environmental Process Engineering, University of Bremen, Leobener Str., UFT, 28359 Bremen, Germany
- [12]. Hollan, I.A. And Chapman, F.S. Liquid mixing a processing in stirred tanks. Reinhold Pub; New York.

- [13]. Lamberto D. J; Alvarez M. M; Muzzio F. J. (1999). Experimental and computational investigation of the laminar flow structure in a stirred tank. Chem. Eng. Sci. 919-942.
- [14]. Lamberto D. J; Muzzio F.J. and Swanson, P.D. (1993), Using time dependent rpm to enhance mixing in stirred vessels. Chem. Eng. Sci. Vol 51, No. 5, 733-741.
- [15]. Martínez-Ramírez J. D; F. J. González F. J; (2006), Velocímetro de Partículas basado en Imágenes Digitales, Simposio de Metrología, Santiago de Querétaro, Qro.
- [16]. Mavros P. (2001). Flow Visualization in Stirred Vessels A Review of Experimental Techniques. Trans IChemE. Vol. 79 Part A.
- [17]. Midoux, M. and Charpentier, J.C.(1984). Mechanically agitated gas liquid reactors (Hydrodynamics). International Chemical Engineering. Vol 24, No. 2
- [17]. Rivera C; Henche M; Ascanio G; Tanguy P. (2004). A virtual finite model for centered and eccentric mixer configurations. Comput. Chem. Eng. 2459-2468.
- [18].- Segura Herrera A. (1988). Reducción del tiempo de mezclado en tanques agitados por medio de perturbaciones geométricas y dinámicas con fluidos no-newtonianos.
- [19].- Tatterson Gary B. (1995). Scaleup and design of industrial mixing processes. Mc Graw-Hill, Inc.
- [20].- Tatterson Gary B. (1991). Fluid mixing and gas dispersion in agitated tanks. Mc Graw-Hill, Inc.