

80
2 es.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



EFFECTO DE LAS PERTURBACIONES DINAMICAS Y
CONDICIONES ASIMETRICAS EN TANQUES AGITADOS
CON FLUIDOS NEWTONIANOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

(AREA MECANICA)

P R E S E N T A :

SELENE ROSA HERNANDEZ DE LA VEGA

DIRECTOR: DR. EDMUNDO BRITO DE LA FUENTE

ASESOR: M. I. GABRIEL ASCANIO GASCA

MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

262418

1998



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

El presente trabajo fue desarrollado en el Centro de Instrumentos de la UNAM para la Facultad de Química, bajo la tutoría del M.I. Gabriel Ascanio, y con la colaboración de Arcelia Segura Herrera. Este proyecto fue financiado por la DGAPA-UNAM con registro IN-502696.

A mis padres María Elena y Fidel

Por su apoyo , cariño y su infinita paciencia ,
pero más aún por creer en mi en todo momento.

A mi hermana Raquel y a mi prima Berta

Por ser buenas amigas y por ayudarme cuando lo he necesitado.

A Eduardo Vázquez

Por su comprensión, amor y cariño incondicional.

Quisiera expresar mi agradecimiento a las muchas personas que me han prestado su ayuda, a lo largo de diversas etapas, en la elaboración de la presente tesis durante los últimos 15 meses. Sus muestras de apoyo, sus críticas y sugerencias han tenido para mí un valor inestimable.

Agradezco al M. I. Gabriel Ascanio por haberme brindado la oportunidad de integrarme a su equipo de trabajo, pero sobre todo por su valiosa amistad.

A Arcelia por acompañarme en los buenos y malos momentos durante este último año.

Al Sr. Juan Arenas por su valiosa ayuda en el diseño y construcción del equipo y por sus enseñanzas sobre la mecánica.

Al Sr. José Luis Juárez por su desinteresada ayuda en la realización de los planos del equipo.

Al taller de diseño mecánico, en especial a los Sres. Jorge Ríos y Valentín López por su colaboración para la realización de este trabajo.

A Abdul, Alberto, Carlos y Leopoldo por su amistad y compañía en el Centro de Instrumentos.

A Norma Pareja por tener siempre tiempo de escuchar los pormenores que surgieron de este trabajo, pero sobre todo por la amistad que nos ha mantenido unidas.

A los miembros del honorable jurado: Dr. Edmundo Brito, Dr. Alejandro Rodríguez, Dr. Luis Martínez, M.I. Esteban Barrios y M.I. Gabriel Ascanio por sus comentarios y sugerencias en relación con el trabajo escrito.

A todos mis maestros por haberme compartido sus conocimientos durante mi vida académica.

Una mención especial a la máxima casa de estudios: la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por darme las herramientas necesarias para poder lograr mi desarrollo profesional.

Índice general

Nomenclatura	iii
Capítulo 1 Introducción	1
Capítulo 2 El proceso de mezclado	8
2.1. <i>Conceptos básicos</i>	9
2.1.1 Mezclado	9
2.1.2 El tanque agitado mecánicamente	10
2.1.3 Velocidad de deformación y esfuerzos de corte	12
2.1.4 Velocidad de fluido	12
2.1.5 Flujo laminar y turbulento	14
2.2. <i>Sustancias de Mezclado</i>	15
2.2.1 Fluidos newtonianos	16
2.2.2 Fluidos no-newtonianos	18
2.3. <i>El consumo de potencia por agitación</i>	19
2.3.1 Relaciones de potencia	21
Capítulo 3 Hidrodinámica en tanques agitados	24
3.1. <i>Calidad de mezclado</i>	25
3.1.1 Grado de homogenización	25
3.1.2 Tiempo de mezclado	26
3.1.3 Tiempo de recirculación	27
3.2. <i>Hidrodinámica y calidad de mezclado</i>	27

3.2.1 Medición del tiempo de mezclado	28
3.2.1 Análisis dinámico de fluidos en tanques agitados	30
3.3. <i>Rediseño para mejorar la calidad de mezclado</i>	34
Capítulo 4 Descripción del equipo	36
4.1. <i>Estructura principal</i>	36
4.2. <i>El sistema motriz</i>	38
4.2.1 Impulsor	39
4.3. <i>El tanque de agitación</i>	39
4.4. <i>Instrumentación y control</i>	40
4.4.1 Variador de frecuencia	40
4.4.2 Controlador Lógico Programable	42
4.4.3 Conexión variador-PLC	43
4.4.4 Torquímetro	45
Capítulo 5 Pruebas y análisis de resultados	52
5.1. <i>Propiedades del fluido</i>	52
5.2. <i>Condiciones de operación</i>	54
5.2.1 Condiciones geométricas	54
5.2.2 Condiciones dinámicas	56
5.3. <i>Procedimiento</i>	58
5.3.1 Características del equipo para el proceso	59
5.3.2 Técnica de visualización	59
5.3.3 Medición del torque	61
5.4. <i>Resultados</i>	61
5.4.1 Tiempo de mezclado	61
5.4.2 Consumo de potencia	69
5.4.3 Energía de mezclado	76
Conclusiones	79
Bibliografía	82

Nomenclatura

c	Concentración de sustancia
D	Diámetro del impulsor, [m]
D_a	Diámetro del disco del impulsor, [m]
D_b	Ancho de paleta del impulsor, [m]
D_w	Altura de paleta, [m]
E_m	Energía de mezclado, [J]
h	Altura del fluido, [m]
I	Grado de homogenización
N	Velocidad de agitación, [rps]
P_0	Número de potencia
Re	Número de Reynolds
T	Diámetro del tanque, [m]
t_m	Tiempo de mezclado, [s]
t_r	Tiempo de recirculación, [s]
$\dot{\gamma}$	Velocidad de deformación, [s ⁻¹]
$\dot{\gamma}_{prom}$	Velocidad de deformación promedio, [s ⁻¹]
μ	Viscosidad, [Kg/m·s]
ρ	Densidad, [Kg/m ³]
T	Torque, [N·m]
τ	Esfuerzo de deformación, [Pa]

Capítulo 1

Introducción

El mezclado es una de las operaciones más comunes y su importancia industrial puede ser difícilmente exagerada. Las operaciones de mezclado forman parte de casi toda la industria productiva en procesos que involucran cambios físicos y químicos. En consecuencia, el mezclado es una operación central de varios procesos en las industrias alimenticia, farmacéutica, química, de papel y de plásticos, entre otras.

Los primeros estudios sistemáticos sobre esta operación comienzan en los años 80 cuando se observa un incremento en publicaciones debido a los 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 un foro Norte Americano de mezclado de la *AIChE* (*American Institute of Chemical Engineers*) científicos de universidades e industrias estimaron que tan solo 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 sí la escala económica.

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 (Fig. 1.1). El tanque agitado 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 baffles o deflectores y distintas capacidades volumétricas. Lamentablemente, el tanque agitado tiene también sus limitaciones.

Como parte de los problemas observados, se tiene que el análisis de los equipos ya existentes es difícil debido a que éstos se encuentran poco o nada instrumentados, de hecho, un mal diseño difícilmente se detecta y solo se llega a notar una deficiencia en el mezclado cuando resulta obvio en un producto insatisfactorio. El problema por el desconocimiento del diseño no es menos importante en términos de costos de capital y de operación.

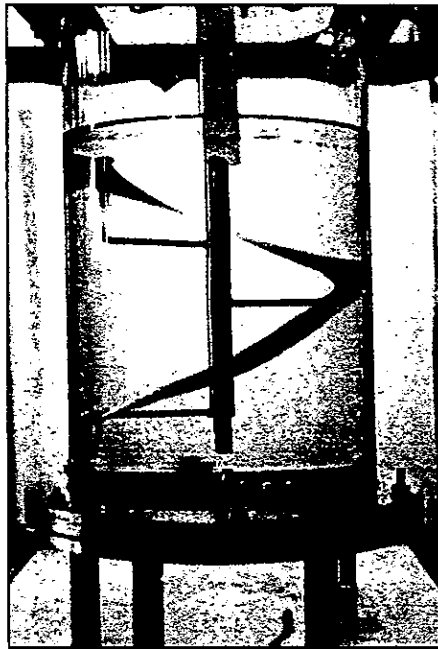


Fig. 1.1 El tanque agitado a nivel laboratorio

Los problemas más serios se encuentran en los tipos de fluidos que se mezclarán. 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. Estudios anteriores [27], [38] han demostrado que para flujos con 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 las cercanías del impulsor mientras el resto del fluido permanece estático (regiones segregadas). Estas regiones provocan un mezclado ineficiente, el cual eventualmente incrementa 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.

Las cantidades macroscópicas como el consumo de potencia, y en algunos casos el tiempo de mezclado han sido utilizadas para diseñar y caracterizar a los sistemas de mezclado. Es común evaluar un sistema en términos del número de potencia, P_0 , y el número de Reynolds, Re , en las llamadas curvas de potencia. Existen en la literatura reportadas curvas de potencia para cada tipo de impulsor y de sistemas de agitación en general [33]. El tiempo de mezclado a menudo se utiliza como parámetro en la calidad del mismo, sin embargo, aunque pueda producirse un mezclado aparentemente homogéneo en un tiempo relativamente corto, la segregación puede presentarse después y reducir la calidad.

En ocasiones, el tiempo de mezclado se mejora incrementando la velocidad de agitación, pero en algunas ocasiones resulta impráctico. Por ejemplo, debido a las altas viscosidades típicas de las reacciones de polimerización, el incrementar la velocidad provoca un gran incremento en el consumo de potencia y requerimientos del torque que exceden las capacidades del equipo. El sobremezclado es otro problema que resulta de esta operación; existe un gran número de situaciones donde el mezclado no es solo una pérdida de energía sino que también resulta contraproducente. Para algunos materiales biológicos, las excesivas potencias de entrada o las altas velocidades del

impulsor causan alteraciones importantes de sus propiedades que pueden llegar incluso, a inutilizar el producto obtenido.

Existen otros parámetros que deben tenerse en cuenta para el proceso como la selección adecuada de impulsores que dependen de las condiciones reológicas del material y del régimen con el que se trabaja. En la mayoría de situaciones de flujo, los regímenes pueden caracterizarse como laminar o turbulento. En tanques agitados, existe una región importante entre las dos, representando la transición de un régimen a otro. Es conveniente describir los mecanismos de mezclado bajo las condiciones de régimen laminar y turbulento, los cuales serán discutidos más adelante en el capítulo 2.

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 tiempo de mezclado, la mejor opción son los impulsores grandes cuyo diseño permiten flujo tanto axial como radial. Los agitadores helicoidales pertenecen a esta categoría y como se demuestra en la literatura [6],[8], cuando se mezclan estos fluidos complejos, los agitadores helicoidales requieren un tiempo de mezclado más corto comparados con los impulsores “pequeños” como las turbinas o propelas, aunque el consumo de potencia sea significativamente mayor.

La búsqueda de nuevos y mejores métodos que nos permitan hacer un uso eficiente de los recursos con que se cuenta, siempre ha generado inquietud, por ello, lo que se pretende con este trabajo es la disminución del tiempo de mezclado de forma que los costos no se incrementen. Por lo tanto, el encontrar formas adecuadas de mejorar el mezclado en tanques agitados de determinado diseño, bajo condiciones de agitación moderadas, podría ser altamente benéfico para la mayoría de las aplicaciones industriales. El objetivo es, por lo tanto, que con potencias de entrada típicas, en tiempos de mezclado adecuados y con el equipo ya existente, se logre una alta calidad de mezclado evitando la formación de cavernas mediante la variación de parámetros dinámicos y geométricos como función del tiempo.

A pesar de que investigaciones anteriores sobre tiempos de mezclado, patrones y velocidades de flujo basaron sus estudios utilizando técnicas intrusivas, han establecido que para flujos de $Re < 500$, el mezclado en tanques agitados es a menudo ineficiente formando zonas segregadas. En contraste con lo que se asumía de que estas zonas eran fácilmente destruidas mediante deflectores, muchos de estos estudios han reportado la persistencia de zonas toroidales bien definidas por encima y debajo del impulsor aún con la presencia de deflectores (Fig. 1.2). Sin embargo, aunque es obvio que tales regiones afectan significativamente el proceso, se tiene muy poca información en la literatura con el objeto de prevenirlas o destruirlas.



Fig. 1.2 Zonas segregadas creadas en procesos de mezclado bajo $Re < 500$

Uno de estos estudios, publicado en 1996 por Lamberto y Muzzio [23], muestra que las islas de fluido no mezclado en un tanque agitado pueden a menudo ser eliminadas mediante la imposición de perturbaciones dinámicas bajo el concepto de mezclado caótico. En ese trabajo se utilizó una técnica no intrusiva basada en la visualización directa de una mezcla ácido-base-indicador para revelar la presencia de zonas segregadas. Las perturbaciones dinámicas a las que se refiere, son generadas mediante el cambio de la velocidad de agitación de 100 a 50 rpm como función del tiempo. La figura 1.3 muestra parte de los resultados obtenidos indicando el comportamiento del fluido

debido al cambio de velocidad. El tiempo de mezclado se ve disminuido notablemente ante la disminución periódica de las islas de fluido en cada ciclo.

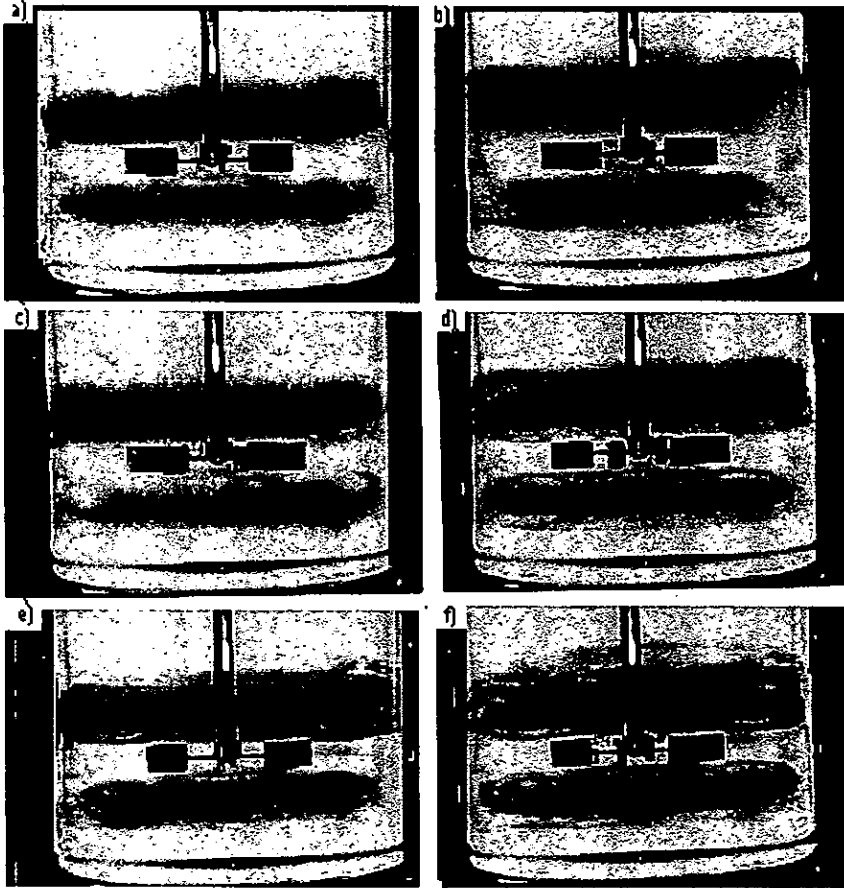


Fig. 1.3. Efectos del mezclado a velocidades dependientes del tiempo. a) Las regiones segregadas son evidentes después de un mezclado a 100 rpm por 30.5min. b) Mezclado a 10 s, c) 20 s y d) 30 s después de que la velocidad del impulsor ha sido reducida a 50 rpm. e) Mezclado a 10 s y f) 20 s después de que la velocidad ha sido cambiada a 100 rpm.

El trabajo de esta tesis se basa en el mismo principio en el cual ha sido demostrado que un buen mezclado en flujos con bajos números de Reynolds puede lograrse mediante la generación de flujo caótico [2], y que las islas de movimiento no caótico en un flujo pueden eliminarse por la formación de perturbaciones dinámicas tanto por la dirección de giro como por la velocidad de agitación.

En este trabajo se generan perturbaciones tanto dinámicas como geométricas, mediante la variación de la velocidad y sentido de giro del impulsor, como funciones del tiempo por medio de un Controlador Lógico Programable y desplazando axial y radialmente el agitador fijándose en una posición distinta del centro con el propósito de alterar la simetría del sistema.

Se diseñó una plataforma experimental de manera que pudiera permitir los movimientos requeridos y que su versatilidad permitiera pruebas posteriores con distintas configuraciones de agitación. En el capítulo 4 se presenta el diseño del equipo antes mencionado.

Para evaluar el desempeño del sistema en términos de tiempo de mezclado, fue necesario hacer uso de la técnica común basada en la inyección de un trazador colorante, de manera que pudiera ser monitoreado visualmente hasta que el fluido tuviera una homogeneidad aceptable debida a una coloración uniforme. Para el consumo de potencia, fue instalado un torquímetro en la flecha del impulsor para que con esta lectura y la velocidad de agitación se obtuviera el parámetro deseado.

En el capítulo 2 de este trabajo se describen los conceptos básicos que permiten comprender de manera simple la importancia de los materiales a mezclar y los parámetros requeridos para el diseño y selección de equipo. El capítulo 3 describe a detalle, la calidad de mezclado en términos del tiempo así como las técnicas de análisis del comportamiento de los fluidos más comúnmente utilizadas. El capítulo 5 se dedica al análisis de los resultados experimentales y finalmente se presentan las conclusiones y bibliografía.

Capítulo 2

El proceso de mezclado

Al ser el mezclado una de las operaciones más comunes en cualquier ámbito, el número de sustancias que son susceptibles a mezclarse con otras es simplemente infinito. Las sustancias a mezclarse pueden encontrarse en cualquier estado físico, lo que implica la generación de más problemas que dificultan la obtención de un producto final homogéneo.

A pesar de que las propiedades reológicas son las variables que más influyen en la selección del tipo de mezclado, a nivel industrial el mezclado cobra otras dimensiones, pues las restricciones para el equipo y tipo de mezclado aumentan en función de la reducción de costos. Para hacer más eficiente el mezclado y satisfacer todas las necesidades de la industria es necesario hacer estudios exhaustivos sobre todos los elementos que intervienen en él, 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.

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.

2.1. Conceptos básicos

El mezclado es una operación que prácticamente se encuentra presente en todo proceso de transformación físico y/o químico. En la introducción de este trabajo se comentó su importancia económica, pero pese a esto, el mezclado es quizás una de las operaciones menos estudiadas por la comunidad académica e industrial.

La literatura de mezclado ha sido analizada de distintas maneras: por los tipos de impulsores, por el régimen de flujo, por las aplicaciones específicas y por las analogías de flujo; pero desde una perspectiva ingenieril, una de las formas que quizás es la más eficiente para analizar el mezclado es a través de los parámetros que caracterizan esta operación como el consumo de potencia y el tiempo de mezclado. En esta sección se revisan los conceptos básicos de mezclado que permiten evaluar lo que se requiere para el adecuado diseño y selección de equipo en tanques agitados.

2.1.1 Mezclado

De manera general, el mezclado puede definirse como “ la incorporación de dos o más sustancias disímiles de un material con el fin de obtener un nivel adecuado de uniformidad, ya sea físico o químico, en el producto final”. La agitación además “crea un estado de actividad tal como flujo o turbulencia” [19]. En general, el término mezclado se aplica a las operaciones encaminadas a reducir desigualdades o gradientes en composición, propiedades o temperatura de un material.

En todos los dispositivos de mezclado, debe existir un flujo convectivo, de forma que no existan regiones estancadas dentro del tanque. Además debe haber una región de altos esfuerzos de corte que puedan producir una reducción en las desigualdades de concentración o un incremento en la velocidad del proceso. Ambos procesos requieren un suministro de energía para llevarlos a cabo. La proporción de energía que deriva para dichos procesos, depende de cada aplicación en particular.

2.1.2 El tanque agitado mecánicamente

El equipo de mezclado más comúnmente usado en las operaciones de proceso es el tanque agitado mecánicamente. El diseño de estos reactores 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 del monitoreo y control de las variables importantes del proceso.

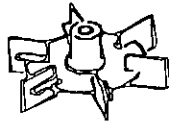
Diseñar un mezclador significa establecer sus características de tal manera que cumpla con sus funciones básicas de homogeneización [28]. En el caso de los tanques agitados, el diseño incluye el establecimiento de:

- Sus dimensiones geométricas.
- El número y tipo de impulsores.
- La capacidad del motor.
- El diseño mecánico (tanque, boquillas, conexiones, puertos, flecha, sellos).

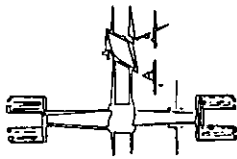
La mayoría de los tanques de mezclado a escala laboratorio están hechos de vidrio con tapas de acero inoxidable, mientras que los de nivel industrial son fabricados en acero inoxidable. La relación entre la altura del líquido y el diámetro del tanque (h/T), en los mezcladores industriales es generalmente de 2:1 o 3:1, siendo la estándar $h=T$, usada como parámetro de diseño. Usualmente, el sistema de agitación consta de dos o tres impulsores. La relación entre el diámetro del impulsor medido desde los extremos de sus paletas y el diámetro del tanque es generalmente de 0.3 a 0.5. La distancia más común entre cada impulsor es de 1.0 a 1.5 veces el diámetro del impulsor. Se instalan generalmente cuatro deflectores equidistantes, cuya finalidad es la de evitar la formación de vórtices que reducen considerablemente la eficiencia del mezclado.

En los sistemas de agitación mecánica se utilizan diferentes tipos de impulsores y diferentes configuraciones, cuya finalidad es provocar el movimiento y mezclado del fluido en el tanque. En el área de fluidos incompresibles, existen generalmente dos tipos de impulsores (dependiendo

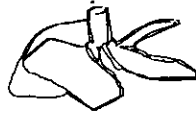
de la relación de diámetros entre el impulsor y el tanque contenedor): a) los denominados impulsores pequeños, los cuales por lo general se trabajan en regímenes de flujo turbulento y se ocupan para viscosidades cercanas a las del agua; y b) los denominados impulsores de proximidad, que se ocupan para el mezclado de fluidos altamente viscosos o de comportamiento reológico complejo y que por lo general se trabajan en régimen laminar. En la figura 2.1 se presentan algunos de los impulsores más empleados.



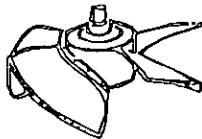
Rushton Turbina



Intermig



Lightnin A-315



Prochem hidrofoil



Scaba GSRGT

Fig. 2.1 Tipos de impulsores

2.1.3 Velocidad de deformación y esfuerzos de corte

En la figura 2.2 se muestra cuando un impulsor de turbina se encuentra en movimiento dentro del fluido, crea en el área opuesta a sus paletas, un perfil de velocidades como el indicado. Podemos definir a la velocidad de deformación como el gradiente de velocidades tomado en cualquier punto y está 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.

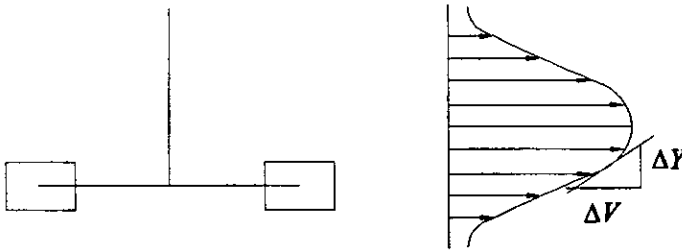


Fig. 2.2 Perfil de velocidades en la paleta del impulsor

2.1.4 Velocidad de fluido

En las proximidades de un impulsor de turbina, se genera un perfil de velocidades que depende de la velocidad a la que gire el impulsor (Fig. 2.3). Por medio de estos perfiles se puede calcular la velocidad de deformación máxima y la velocidad de deformación promedio.

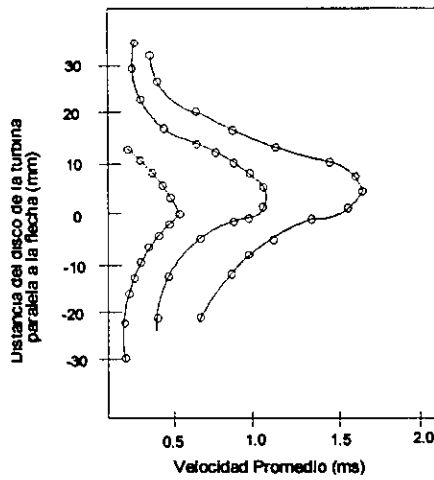


Fig. 2.3 Perfil de velocidad promedio en turbina Rushton

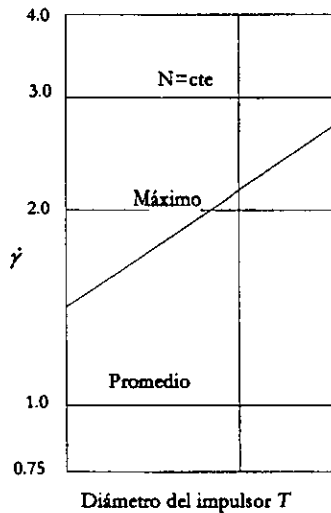


Fig. 2.4 Velocidad de deformación promedio y máxima en función del diámetro del impulsor.

Para una geometría dada de impulsor, sí el diámetro es mayor, la deformación máxima se incrementa mientras que la velocidad promedio no se altera. Esto significa que la velocidad de deformación máxima depende tanto de la velocidad como del diámetro del impulsor, en tanto que la velocidad de deformación promedio es sólo función de la velocidad. La figura 2.4 muestra este patrón de flujo.

2.1.5 Flujos laminar y turbulento

El conocimiento de la forma en que los líquidos se mueven para alcanzar los requerimientos es un prerrequisito esencial para una exitosa selección o diseño de mezcladores. Los diferentes regímenes de flujo constituyen los mecanismos de mezclado.

El flujo laminar es asociado comúnmente con líquidos de muy altas viscosidades y para que el fluido sea puramente laminar se requieren viscosidades mayores a $10 \text{ Kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$. Bajo estas condiciones las fuerzas inerciales desaparecen rápidamente por lo que los impulsores deben ocupar una porción significativa del tanque. Cerca de estas regiones rotatorias existen grandes gradientes de velocidad. Estas regiones son llamadas de alta velocidad de deformación, las cuales causan que los elementos de fluido sean deformados y alargados. Cada vez que los elementos elongados pasan a través de las regiones de alta velocidad de deformación, experimentan un proceso similar pero a menor escala. La figura 2.5 muestra estos efectos.

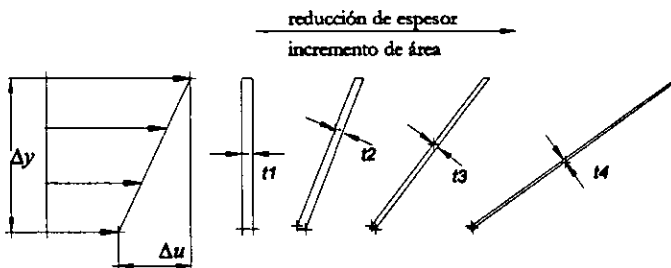


Fig. 2.5. Deformación de los elementos de fluido

Para propósitos prácticos, el flujo en tanques agitados con impulsores rotatorios es turbulento si la viscosidad es menor a $10 \text{ e}^{-3} \text{ Kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$. Aquí la inercia que imparte el impulsor rotatorio al fluido es suficiente para hacerlo circular a través del tanque y regresarlo de nuevo al impulsor. Durante el pasaje del fluido, toma lugar la difusión turbulenta de remolinos teniendo su máximo en la región del impulsor. Estas permiten que el mezclado sea mucho más rápido que el asociado con los mecanismos de flujo laminar.

La tasa de mezclado en flujo turbulento es mucho mayor cerca del impulsor. Aquí existe una alta velocidad de deformación debido a los vórtices que son asociados a los impulsores de turbina y una alta porción de energía se disipa en esta región.

2.2. 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 en la búsqueda de 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. Los materiales se pueden clasificar de una manera general como:

Fluidos

- Inelásticos dependientes del tiempo
- Inelásticos independientes del tiempo
- Viscoelásticos

Sólidos

- Elástico
- 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, provocará un movimiento en éste. 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, algunas de ellas son:

En función de la velocidad de deformación

- Newtonianos
- No newtonianos

Por su viscosidad

- Altamente viscosos
- Viscosidad baja (no viscosos)

2.2.1 Fluidos newtonianos

Un fluido newtoniano es un fluido viscoso para el cual el esfuerzo es linealmente proporcional a la rapidez de deformación, es decir, que la

resistencia de los fluidos a “resbalar” es proporcional a la velocidad con la que las partes del fluido han sido separadas de otras. Entonces se tiene:

$$\tau \propto \dot{\gamma} \tag{2.3}$$

eliminando la proporcionalidad de (2.3),

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \tag{2.4}$$

donde μ es la constante de proporcionalidad y se le conoce como viscosidad. La viscosidad en fluidos newtonianos solo es una función de la temperatura y en un grado casi despreciable de la presión a las que se encuentre sometido el fluido. La figura 2.6 muestra el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no-newtonianos que se explicarán en la siguiente sección

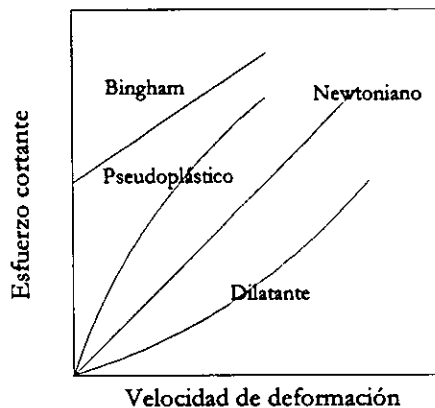


Figura 2.6. Comportamiento reológico de algunos materiales

2.2.2 Fluidos no-newtonianos

No es difícil suponer que la inmensa mayoría de los fluidos no presentan el comportamiento newtoniano descrito anteriormente. A este grupo de fluidos se les conoce como no-newtonianos (figura 2.7) y son aquellos en los que el esfuerzo cortante varía en forma no lineal con respecto a la rapidez de deformación, consecuentemente la viscosidad ya no es constante pues es una función de la rapidez de deformación y del tiempo, es decir:

$$\tau = \mu_{(\dot{\gamma})} \left(\frac{du}{dy} \right) = \mu_{(\dot{\gamma})} \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Los fluidos no-newtonianos a su vez se pueden clasificar en las siguientes categorías:

Esfuerzo en función de la velocidad de deformación

- Dilatante: Es aquel en el que la resistencia a la deformación aumenta al aumentar el esfuerzo cortante.
- Pseudoplástico: Es aquel en el que la resistencia a la deformación disminuye al aumentar el esfuerzo cortante.
- Plástico ideal de Bingham: Este tipo de fluido necesita de un esfuerzo finito para que el fluido comience a fluir.

Efecto del tiempo

- Reopéctico: Son los fluidos que para mantener una velocidad de deformación constante se necesita de un aumento en el esfuerzo cortante.
- Tixotrópico: Son aquellos fluidos en los que es necesario una disminución del esfuerzo cortante para mantener a la velocidad de deformación constante

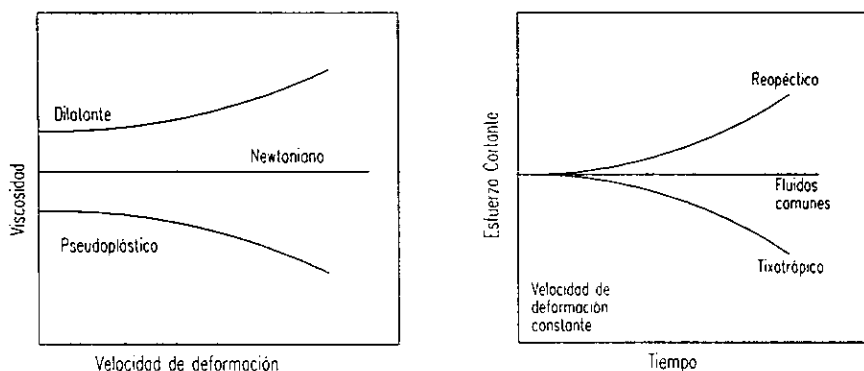


Fig. 2.7 Comportamiento reológico de los fluidos no-newtonianos

2.3. El consumo de potencia por agitación

El consumo de potencia es un parámetro básico en la operación de mezclado, que en gran parte, determina la capacidad de un sistema de agitación para mezclar el fluido y transferir oxígeno. La distribución de la potencia usada en las operaciones de mezclado es de gran interés y la potencia que tiene mayor relevancia en el proceso es aquella que se entrega directamente en el mezclado y que se disipa en el fluido.

La optimización de la economía de producción necesita información de la relación entre la capacidad de aireación (creada por la disipación de la energía por unidad de masa del fluido) y el consumo de energía. Además, la comparación del funcionamiento de diferentes configuraciones de mezcladores o de diferentes tipos de operación pueden ser correctamente evaluados únicamente si se realizan con base en la misma cantidad de energía.

El dispositivo empleado para la medición de la potencia de entrada al impulsor usualmente depende de la escala de operación. La complejidad del sistema motriz puede tener cierta influencia, debido a las dificultades que pueden encontrarse en la estimación de pérdidas y eficiencias. En una escala

de planta, con motores de más de 15 kW, es posible obtener datos muy precisos de la lectura directa de un wattmetro [9]. A este nivel las pérdidas por fricción en el reductor de velocidad y sellos constituyen un porcentaje muy bajo de la potencia total suministrada al fluido. A medida que la escala decrece, las mediciones eléctricas no son una buena medida de la potencia aplicada. En mezcladores a nivel laboratorio, las pérdidas por fricción pueden llegar a ser hasta del 75% del total suministrado por el motor [9].

Una revisión de las técnicas de medición del consumo de potencia en tanques agitados indica que para tanques pequeños abiertos, los dinamómetros basados en un cojinete de fricción despreciable (neumático o hidráulico), en donde se mide el torque de reacción son la mejor opción [30], [34]. A nivel de banco o piloto, el sistema más preciso es aquel en el que se utilizan detectores de esfuerzo (*strain gauges*) montados en la flecha del impulsor [22].

En este trabajo, se evaluará la potencia total requerida por el impulsor a nivel laboratorio mediante un torquímetro acoplado a la flecha de agitación, debido a que en este caso las pérdidas por fricción son despreciables.

El valor de la potencia de entrada es calculada por:

$$P = 2\pi TN \quad (2.4)$$

donde T es obtenida directamente del torquímetro. En este punto se observa que la velocidad del impulsor N es una variable necesaria para el cálculo de la potencia.

Es importante mencionar que cuando un fluido en agitación se aerea, la potencia consumida por el agitador disminuye y la caída de potencia generalmente se expresa como la relación entre la potencia sin airear respecto a la aireada .

2.3.1 Relaciones de potencia

En la figura 2.8 se muestra una gráfica obtenida a partir de la medición de la potencia consumida por impulsores cada vez mayores, en el mismo fluido, para diferentes velocidades de agitación y manteniendo una relación D/T constante (diámetro del impulsor/diámetro del tanque).

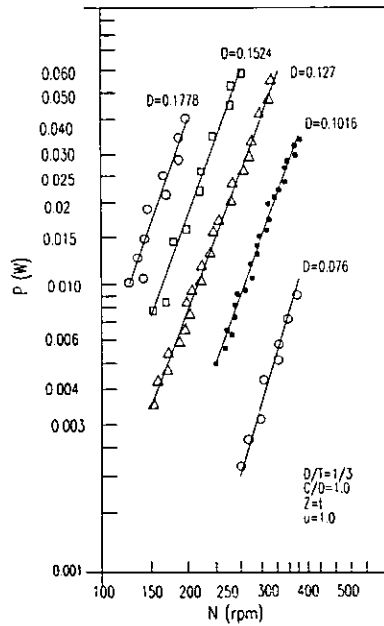


Fig. 2.8 Curvas de potencia en función del diámetro y velocidad de agitación de turbinas Rushton [33]

Analizando la gráfica, es posible notar que sin importar el diámetro del impulsor, la pendiente de las rectas obtenidas permanece constante e igual a 3, por lo tanto:

$$P \propto N^3 \quad (2.5)$$

Si se fija ahora la velocidad de agitación y se construye un gráfico la potencia en términos del diámetro del impulsor, se observa que:

$$P \propto D^5 \quad (2.6)$$

por lo que de (2.5) y (2.6), tenemos:

$$P \propto N^3 D^5 \quad (2.7)$$

Para el proceso de agitación, es común representar las relaciones de potencia en términos de los siguientes números adimensionales [7], obtenidos mediante los principios de análisis dimensional:

$$P_0 = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (2.8)$$

$$R_e = \frac{ND^2 \rho}{\mu} \quad (2.9)$$

En la figura 2.9 se muestra una curva típica P_0 vs. R_e no-newtonianos utilizando un impulsor de paletas planas, la cual se construye con las ecuaciones (2.8) y (2.9). Este tipo de gráficas tienen tres zonas que las caracterizan: la región laminar en donde la potencia es inversamente proporcional al número de Reynolds; una zona de transición y la región turbulenta donde la potencia se vuelve independiente del R_e . Es necesario remarcar que no se tiene un número exacto a partir del cual se define la zona turbulenta, pues es específico para cada impulsor (entre $R_e = 10^3$ y 10^5).

Debe hacerse notar que la forma de la curva de potencia y los valores absolutos de Po dependen de los siguientes factores:

- El tipo de impulsor y su posición dentro del tanque
- La geometría del tanque.
- El nivel del líquido.
- Presencia, geometría y número de deflectores .
- Las propiedades reológicas del fluido.

Cada uno de estos factores requiere de atención especial y han sido estudiados por separado para caracterizar un sistema de agitación [14].

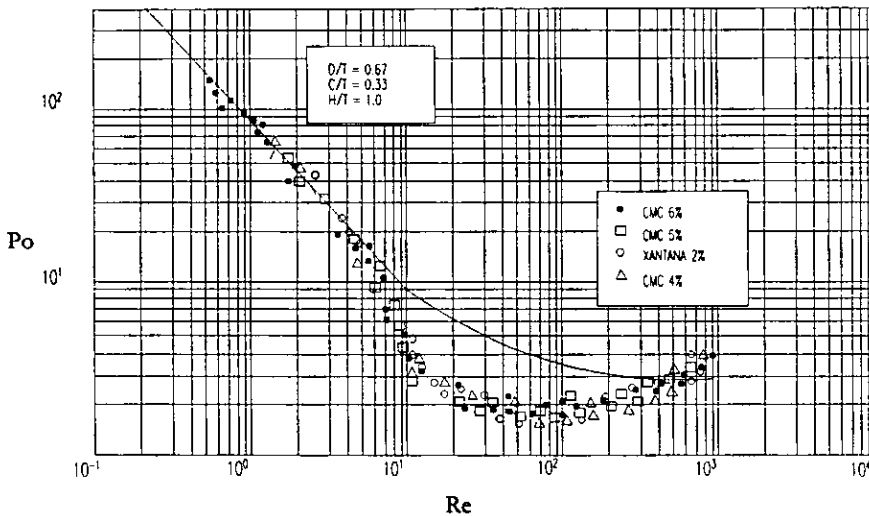


Fig. 2.9 Gráfica de Po vs Re , [19].

Este tipo de gráficas han sido reportadas en la literatura para un solo impulsor por sistema, pero cuando se tienen impulsores duales o múltiples es necesario considerar que no existe interacción entre la zona de agitación de cada impulsor, consideración que puede causar problemas puesto que no es totalmente válida.

Capítulo 3

Hidrodinámica en tanques agitados

En los capítulos precedentes se ha mencionado la importancia de las operaciones de mezclado y las dificultades que se presentan debido a la escasa documentación que existe, por lo que algunos investigadores consideran a las operaciones de mezclado más que una ciencia, un arte [16].

Debido a la gama de dificultades que presentan las operaciones de mezclado, los diseñadores de equipo de mezclado están volcándose hacia herramientas modernas para el análisis y visualización de flujo para determinar si un proceso está llevándose a cabo satisfactoriamente al dar como resultado final un producto homogéneo.

En el presente capítulo se mencionan algunos conceptos que se involucran directamente con el producto final del mezclado y algunas herramientas que permiten el estudio del comportamiento de los fluidos en los tanques agitados, para que todos en un solo conjunto generen un mejor entendimiento del proceso de mezclado y determinar a su vez si el rumbo que llevan las nuevas ideas son las adecuadas.

3.1 Calidad de Mezclado

El objetivo principal del mezclado es alcanzar la homogeneidad en el producto final. Sin embargo, no es el único factor que permite determinar si la operación se está llevando de la manera correcta.

Hablar de una calidad de mezclado puede traer ciertas dificultades debido a la subjetividad del término. Algunos investigadores definen a la calidad de mezclado como el grado de homogeneidad (establecido o no) que alcanza un producto final [12] pero, en un contexto más estricto, la calidad de mezclado se puede definir como la obtención de un grado del 90% de homogeneidad en un período pequeño de tiempo. Un grado del 100% de homogeneidad implica tener un tiempo infinito, por lo que una mezcla con el 90%, puede considerarse como óptima.

La determinación de la calidad de una mezcla es difícil por el concepto mismo, ya que no se tienen métodos perfectamente establecidos que permitan obtenerla. En la mayoría de los casos el sentido común es el que nos ayuda a inferir si la mezcla tiene la homogeneidad requerida, cuando quizá este lejos de tenerla. Para eliminar estos problemas, se han definido algunos métodos que permiten la medición de la calidad de forma cuantitativa, algunos de ellos se exponen en las siguientes secciones.

3.1.1 Grado de homogenización

El grado de homogenización I , es la forma más directa para evaluar la calidad de mezclado pero no siempre resulta ser la más representativa. Está definida por:

$$I = 1 - \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{c_i - c_f}{c_0 - c_f} \quad (3.1)$$

Este parámetro es evaluado, mediante la toma simultánea de muestras de j puntos representativos, determinándose las concentraciones de c_i del

componente de interés, siendo c_f la concentración final deseada y c_0 la concentración inicial. Uno de los problemas que presenta este parámetro es que solo es válido para el proceso en estudio, por lo que no es posible realizar comparaciones entre procesos [12].

3.1.2 Tiempo de mezclado

Un factor que llama poderosamente la atención y que gracias a él se cuenta con más fundamentos para asegurar si el producto final satisface las necesidades de operación, es el tiempo en el cual la mezcla alcanza un cierto grado de homogeneidad y se le conoce como tiempo de mezclado, t_m . La importancia del tiempo de mezclado radica en que si es muy grande, éste se traduce en un aumento de la potencia consumida y a su vez en el incremento de los costos de producción, los cuales pueden llegar a ser bastante altos.

Se ha demostrado que para tanques agitados, el tiempo de mezclado es una función del número de Reynolds Re , el cual a su vez se determina en función de la velocidad de agitación N y de la reología del sistema [12]

$$t_m = 107.5 \times 2^{\frac{-2(1+n)}{3n}} \frac{1}{N} \quad (3.2)$$

donde n es un parámetro característico de los fluidos. Para fluidos Newtonianos $n=1$, entonces de (3.2) se tiene:

$$t_m = 42.7 \frac{1}{N} \quad (3.3)$$

El tiempo de mezclado tampoco es un parámetro que permita caracterizar de manera confiable un mezclado, ya que no proporciona ninguna información sobre el comportamiento del fluido en el tanque. De hecho, dos mezclas pueden tener el mismo tiempo de mezclado, mientras que los mecanismos y condiciones de operación son muy diferentes.

3.1.3 Tiempo de recirculación

El tiempo de circulación t_R permite conocer un poco más a fondo el comportamiento del fluido dentro del tanque de agitación. Se define como el tiempo que le toma a una partícula de fluido en regresar a la zona del impulsor en donde fue formada por vez primera. El tiempo de circulación está relacionado con la capacidad de bombeo del impulsor. Este tiempo puede ser medido por la periodicidad de la curva de respuesta obtenida en los tiempos de mezclado.

Si el fluido es newtoniano y se usa un solo impulsor, el tiempo promedio de circulación solo depende de las condiciones geométricas y de operación [12].

$$Nt_R = 0.76 \left(\frac{h}{T} \right) \left(\frac{T}{D} \right)^{2.7} \quad (3.4)$$

3.2. Hidrodinámica y calidad de mezclado en tanques agitados.

A pesar de la dificultad y el empirismo que presenta el análisis de la dinámica de los fluidos en los tanques agitados, la importancia y la influencia que las operaciones de mezclado tienen sobre la industria obligan a tener bases y conocimientos más sólidos concernientes a éstas.

Es por ello que en investigaciones recientes se han invertido fuertes cantidades de capital para tener herramientas más modernas que permitan resultados más detallados y confiables. Sin embargo, es totalmente válido hacer uso de los métodos tradicionales como: trazadores de tinta e indicadores de alcalinidad para poder tener una gama de resultados susceptibles de comparación.

3.2.1 Medición del tiempo de mezclado

Una de las técnicas comúnmente utilizadas para la medición del tiempo de mezclado se basan en la inyección de trazadores. Existen varios tipos de trazadores como: fluido caliente, sales, mezclas ácido-base, compuestos radioactivos y colorantes. La elección de los trazadores debe hacerse siempre tomando en cuenta que éste no perturbe el fluido de trabajo si es que es importante mantenerlo con un grado alto de pureza. A continuación se describen algunas de éstas técnicas:

- **Fluido caliente**

Este método se basa en la inyección de una pequeña cantidad del mismo fluido de trabajo a una temperatura mayor. El monitoreo de datos se hace por medio de un conjunto de termistores localizados en diferentes posiciones dentro del contenedor y por una interfaz de adquisición de datos (Fig. 3.1).

Este método ofrece muchas ventajas, una de ellas es que permite la realización de un número ilimitado de pruebas ya que el fluido de trabajo no se ve afectado. Otra ventaja es que las propiedades reológicas no cambian drásticamente ni aún cuando los fluidos de trabajo sean termo-sensibles. La desventaja es que no permite la visualización del comportamiento de las líneas de flujo y que el punto de inyección del fluido caliente debe ser constante [6].

También por medio de la interfaz de adquisición de datos se pueden obtener gráficos de temperatura *vs.* tiempo, donde se puede observar claramente el comportamiento del fluido en la vecindad de cada uno de los termistores utilizados y el tiempo final de mezclado cuando la temperatura tiende a ser constante.

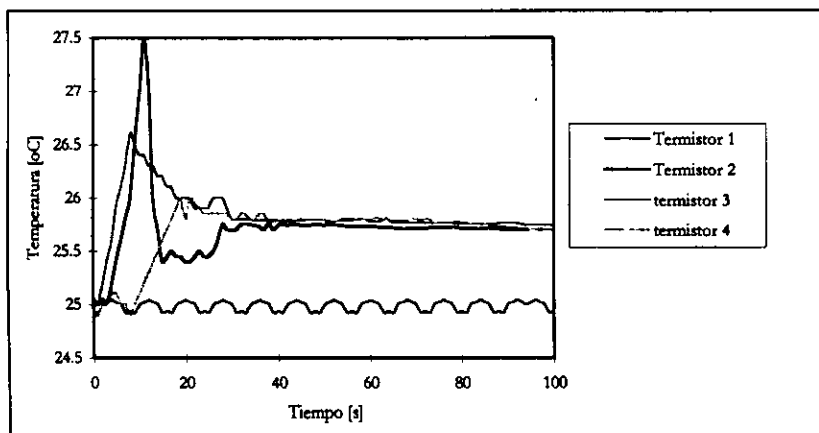
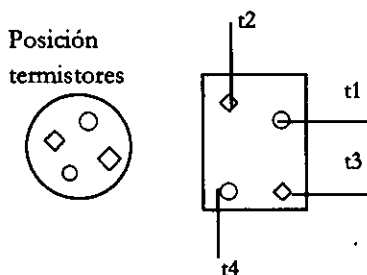


Fig. 3.1 Gráfico de la técnica de fluido caliente

- **Colorantes e indicador ácido-base**

El principio de la técnica de colorantes se basa en la inyección de una tinta como trazador en donde por lo general el tiempo de mezclado se mide cualitativamente, es decir, la vista y el sentido común determina el tiempo en el cual la mezcla alcanza un grado de homogeneidad adecuado.

La técnica con indicador ácido-base es no intrusiva y es muy semejante a la de los colorantes. Primero se le agrega al fluido de trabajo una sustancia indicadora de P.H.; este sistema se mezcla hasta obtener un color uniforme después se le agrega la solución ácido-base. Si en el contenedor se presentan zonas de color amarillo, entonces en esta zona se encuentra una gran concentración de ácido mientras las que presentan un color rojizo indican que se tienen un exceso de base [23]. El tiempo de mezclado será entonces cuando esas zonas queden totalmente destruidas, es decir, cuando ya no se observe una diferencia de colores que a su vez indica la neutralización del fluido.

La ventaja de estos métodos es que además de permitir la medición de los tiempos de mezclado, también se puede observar el comportamiento del fluido a las condiciones de operación, el cual es el primer paso para un análisis más profundo del proceso.

La desventaja es que al ser métodos por inspección visual se puede incurrir fácilmente en errores de tipo humano. Para que en el monitoreo de los tiempos obtenidos se cometa un error humano menor y los datos tengan mayor validez, se aconseja tomar vídeo de todas las pruebas con el fin de analizarlas cuantas veces se desee y confirmar así los tiempos obtenidos con toda tranquilidad.

3.2.2 Análisis dinámico de fluidos en tanques agitados

El primer paso para comprender mejor el comportamiento de los fluidos en las operaciones de mezclado es tener un correcto mapeo del campo de flujo.

Los métodos hasta ahora utilizados pueden dividirse en dos ramas generales. La primera realiza las mediciones de las propiedades del fluido y las condiciones del campo de flujo en puntos establecidos, la mayoría de las técnicas utilizadas en este caso son mediante la inserción de hilos calientes, sondas piezoeléctricas y tubos de Pitot que desgraciadamente perturban el campo de flujo local. El segundo grupo de métodos se basa en la medición de las propiedades de un flujo completo una sola vez.

• Velocímetro láser doppler (LDV)

Es una técnica no intrusiva que utiliza dos haces de luz: el haz de medición y el haz de referencia. Cuando estos dos haces de luz se intersectan en un ángulo 2α , crean lo que se conoce como volumen de medición en el punto de intersección. Cualquier partícula pequeña ($0.01-0.05 \mu m$) presente en el fluido será iluminada cuando pase a través del volumen de medición. El efecto de las partículas es sin embargo despreciable. Por lo que es necesario asumir que la trayectoria de la partícula representa el flujo del fluido en un punto en particular.

La luz esparcida por el haz de medición y la luz no esparcida por el haz de referencia son mezcladas en la superficie de un fotodetector el cual da una señal diferencial. La velocidad de la partícula puede ser medida analizando esta señal (Fig. 3.2).

Las mediciones por el LDV se realizan en un punto específico del tanque durante un cierto período de tiempo. Por lo tanto las velocidades medidas son cantidades promedio del tiempo. Desafortunadamente las mediciones no pueden realizarse simultáneamente a diferentes posiciones, entonces el velocímetro no es capaz de analizar flujos dependientes del tiempo [6].

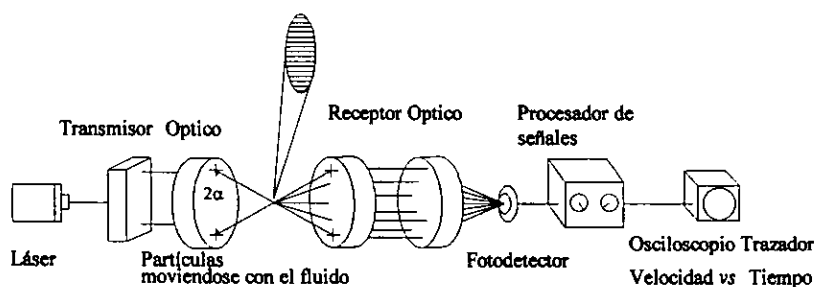


Fig. 3.2 Esquema del velocímetro láser doppler

- **Fotografía de línea de corriente**

Cuando los flujos dependientes del tiempo deben ser analizados es necesario realizar una medición del flujo completo en un instante de tiempo dado. Entre los métodos disponibles para realizar este tipo de pruebas se encuentra la fotografía de línea de corriente.

En este método, se agregan partículas traslúcidas al tanque de mezclado, que es iluminado por un haz plano de luz llamado "hoja luminosa", el cual define un plano de medición. Las partículas llegan a ser visibles solo cuando pasan a través o están contenidas en el plano de la hoja luminosa. Las líneas de corriente pueden ser creadas tomando fotografías a velocidades de disparo apropiadas. Las líneas de las partículas muestran la dirección de las velocidades del fluido en varios puntos con longitud proporcional a la velocidad del fluido en un punto dado.

- **Velocímetro de Partículas**

El velocímetro de partículas es uno de los métodos más avanzados ya que realiza mediciones cuantitativas del comportamiento del fluido (Fig. 3.3). La técnica consiste en iluminar el tanque con una hoja luminosa regularmente desde una fuente láser. Por un doble pulso o tomando dos fotografías sucesivas con una fuente de luz continua, se obtiene una doble exposición del campo de partículas.

El campo de velocidades se calcula por el desplazamiento de las partículas durante el tiempo de exposición. La dificultad de este método es que no es tan obvio cual de las dos imágenes corresponde a la misma partícula. Afortunadamente, existen técnicas de análisis que usan algoritmos de correlación para identificar el trazo de las partículas.

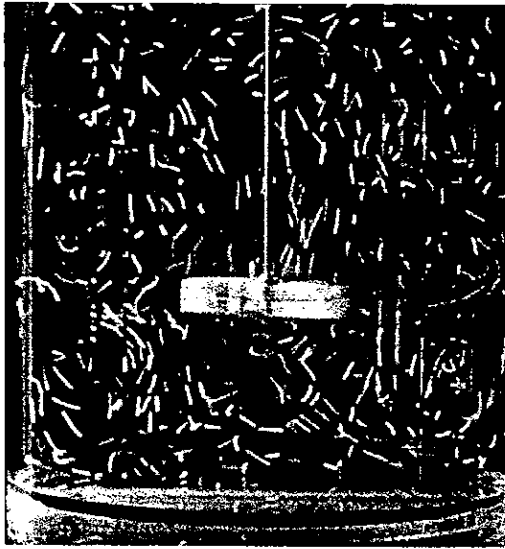


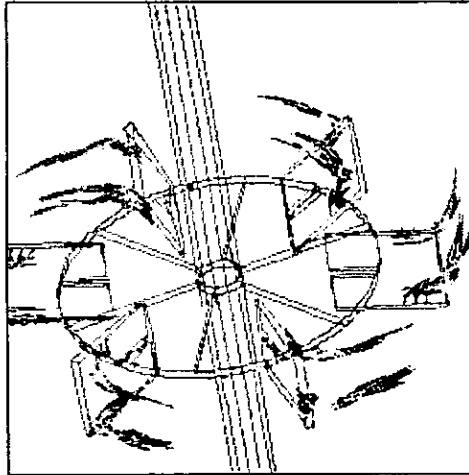
Fig. 3.3 Técnica de velocímetro de partículas [3].

- **Dinámica de fluidos computacional (CFD)**

La dinámica de fluidos computacional mejor conocida por sus siglas en inglés CFD, es una herramienta que permite la modelación de flujos por computadora. El escepticismo mostrado hacia CFD por gran parte de la comunidad científica se está perdiendo debido a la reducción de los obstáculos técnicos y de la facilidad de operación. CFD puede proveer información sobre casi todos los procesos de fluidos aún en los casos más complejos.

Para el mezclado en tanques agitados, CFD brinda una gran gama de posibilidades para la simulación numérica, que incluye el análisis en 2-D y 3-D, basadas en la velocidad de entrada y en las características del impulsor, modelado de distribuciones de burbujas, de turbulencia, de sólidos en suspensión, entre otras.

La técnica de CFD se basa en dividir un área de flujo en un gran número de celdas o volúmenes de control, referidas colectivamente como una malla. En cada una de las celdas, las ecuaciones de conservación de la materia, energía y momento son reescritas de manera algebraica para relacionarse con variables como la presión y temperatura, para después evaluar a las celdas circundantes. Las ecuaciones entonces son resueltas numéricamente. Los resultados se presentan por medio de un modelo en la pantalla con códigos de colores que indican las cantidades de la variable en cuestión.



3.4. Simulación de velocidades en un impulsor de turbina con CFD, [4].

3.3. Rediseño para mejorar la calidad de mezclado

Es lógico pensar que una de las formas para reducir la potencia y el tiempo consumidos en tanques agitados es el rediseño del equipo existente. Generalmente las modificaciones que han sufrido los tanques agitados se han basado en el sentido común y la experiencia de los diseñadores. Pero con las

técnicas descritas anteriormente el rediseño del equipo puede tener bases sólidas que sustenten estos cambios.

Cada equipo de mezclado que se diseña, tiene entre sus objetivos principales la reducción del tiempo en el cual se alcanza la homogeneidad deseada. El tanque agitado sigue siendo en la actualidad el equipo de mezclado que más se utiliza debido a la gama de aplicaciones que tiene en la industria, sin embargo, aún no se corrigen del todo los problemas que también genera.

En el trabajo propuesto se conserva la geometría de los tanques agitados para escala laboratorio (capacidad volumétrica, impulsor, transmisión), por lo que el cambio toma lugar en la forma de operación.

Se propone que el impulsor del tanque agitado tenga la capacidad de localizarse en diferentes posiciones en un rango de longitud radial y axial para que se pueda operar a condiciones asimétricas muy diferentes a los arreglos utilizados hasta el momento. Entonces, el equipo tiene las modificaciones físicas pertinentes para lograr la posición deseada del impulsor, sin embargo, no deja de ser una condición de operación.

Basándose en las investigaciones realizadas por D.J. Lamberto y F.J. Muzzio [23], se propone la realización de arreglos de las velocidades con respecto al tiempo, es decir, el impulsor trabaja con diferentes velocidades y sentidos de giro en determinados periodos de tiempo, por lo que en un principio se pretende es una transferencia de masa mayor por medio de la generación de flujo caótico que impedirá la formación de zonas segregadas.

El equipo propuesto busca que con la combinación de los puntos antes descritos la operación de mezclado pueda realizarse en un periodo de tiempo menor.

Capítulo 4

Descripción del equipo

El equipo de agitación que se describe a continuación tiene como dos de sus objetivos principales proporcionar la versatilidad en cuanto a los movimientos radial y axial del impulsor que son requeridos para perturbar la simetría del sistema y permitir además la manipulación del sistema motriz de tal forma que puedan programarse ciclos con distintas velocidades, tiempos y cambios continuos en el sentido de giro de la flecha de impulsión.

En este capítulo se describe el sistema y la plataforma experimental propuesta, diseñada y fabricada para el presente trabajo (Fig. 4.1). De manera general, puede decirse que dicho sistema está compuesto fundamentalmente por la estructura principal o soporte que consta de una parte fija y otra móvil, el sistema motriz, el tanque de agitación y, por supuesto, su control e instrumentación.

4.1 Estructura principal

La estructura principal del sistema está diseñada de tal forma que además de soportar a todos los elementos, permita el desplazamiento del impulsor y su fácil intercambio y que además permita la visión completa del tanque en operación.

La estructura soporte está compuesta de una parte fija y una móvil. La parte fija (dibujo. ES-01) es una estructura rectangular de 2100 mm de altura por 900 mm de ancho y 600 mm de profundidad como dimensiones exteriores, fabricada en su totalidad con tubular cuadrado PTR de 1 1/4". La parte izquierda de la estructura cuenta con travesaños que forman los soportes del equipo de control e instrumentación, mientras que la parte derecha soporta al sistema motriz y de agitación. En las cuatro piernas exteriores se colocaron pestañas de acero para anclar la estructura al piso.

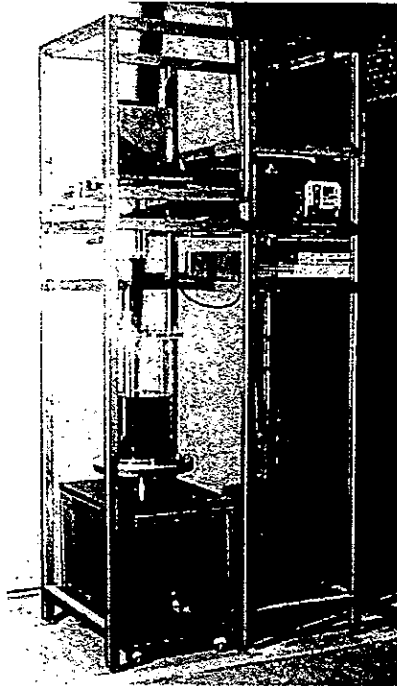


Fig. 4.1 Fotografía del equipo de mezclado

La parte móvil está compuesta básicamente de tres elementos: el carro, la base elevadora y la placa deslizante. El primero de ellos consta de una estructura rectangular de 480 *mm* de altura por 560 *mm* de ancho y 420 *mm* de profundidad, fabricado también en PTR de 1" que además cuenta con 4 ruedas. Sobre el carro existe una plataforma de triplay de pino de 1" forrada de formaica en la cual descansa la base que mediante un "gato" mecánico situado en el interior del carro eleva al tanque agitado permitiendo el desplazamiento axial que se requiere (dibujo. ES-02).

El motor está montado en una placa vertical de fierro de 3/8" de 250 x 250*mm* (dibujo. SO-01) y soportado por otra placa de fierro de 520 x 250 *mm* en cuya cara inferior tiene 4 guías rectangulares para dos flechas y una manivela que permitirán el desplazamiento radial del conjunto incluyendo al impulsor cuando éste se encuentre acoplado.

4.2. El sistema motriz

El sistema motriz es el encargado de proporcionar el movimiento de rotación a la flecha del impulsor y está compuesto básicamente por un motor ABB de CA trifásico con las siguientes características:

Potencia	1.0 H.P
Velocidad	1711 <i>rpm</i>
Voltaje	230 V CA / 460 V CA
Corriente	4.3 A / 2.1 A

El motor se une a un torquímetro, cuya flecha es de 5/8", mediante un cople flexible. Un cople de Nylamid une a la flecha del torquímetro con la del impulsor y consiste en un cilindro que cuenta con dos ranuras diametralmente opuestas que albergan al perno perpendicular a la punta del impulsor de manera que mediante un simple giro, queden acopladas ambas flechas permitiendo así su fácil intercambio. Para cumplir los objetivos del equipo, el sistema motriz debe ser capaz de satisfacer los siguientes requerimientos:

- Girar en ambos sentidos.
- Girar en un rango de 0 a 1500 *rpm* aproximadamente.
- El sentido y las revoluciones del motor deben ser una función del tiempo.

4.2.1 Impulsor

El impulsor que se utilizó para el presente trabajo, fue uno de los agitadores comerciales más empleados en la industria: la turbina Rushton. Este impulsor está constituido por seis paletas igualmente espaciadas soldadas a un disco y formando un ángulo de 90° con el mismo y cuyas dimensiones se muestran en el dibujo MI-01.

La ventaja de esta turbina es que, a pesar de ser uno de los agitadores “pequeños”, transmite mayor potencia a los fluidos en comparación con los impulsores de proximidad, siendo su consumo de potencia mucho menor; sin embargo, la baja generación de flujo axial y el decremento de la intensidad de agitación en el fluido más distante del impulsor, cuando este presenta la configuración geométrica estándar, constituyen su mayor desventaja.

4.3. El Tanque de agitación

El tanque del mezclador es el que se encarga de contener a los fluidos de trabajo y está constituido por un tubo de acrílico de 420 *mm* de altura, 210 *mm* de diámetro interior y un espesor de 5.5 *mm*, por lo que se tiene una capacidad máxima de 14.0 *lt*, aunque bajo las condiciones de operación solo es necesario utilizar aproximadamente el 50% de la capacidad total. Las dimensiones del tubo fueron tomadas de equipos empleados en experimentos anteriores respetando las condiciones de capacidad para nivel laboratorio. El material del tanque se eligió considerando, por un lado su bajo costo y por otro su transparencia, permitiendo así la adecuada visualización de los fluidos y evitando la posible reacción del material con las sustancias de trabajo.

En ambos extremos del tubo se tienen 2 bridas del mismo material del tanque que permiten manejarlo de manera sencilla, además de ser las bases de sujeción de las tapas al mismo. Tienen un diámetro exterior de 290 *mm* y un diámetro interior de 196 *mm* (dib. TA-01).

Las tapas del tanque fueron fabricadas de acero inoxidable, con un diámetro exterior de 290 *mm* y un espesor de 10 *mm*. La tapa superior (dib. TA-02) cuenta con tres ranuras que permiten el deslizamiento radial de la flecha de impulsión y de dos tornillos que la fijan en una posición sin necesidad de quitar la tapa.

Este tipo de equipos normalmente se ve dañado por las vibraciones que sufre la flecha de agitación, lo que puede provocar resultados diferentes a los esperados por las condiciones de operación propuestas. Para reducir las vibraciones de la flecha se utiliza una caja de rodamientos, la cual tiene la capacidad de desplazarse junto con el sistema motriz. La caja construida en acero inoxidable, permite el alojamiento de dos rodamientos de 1 1/8" de diámetro exterior para una flecha de 1/2" y puede fijarse a la tapa superior mediante tornillos.

4.4. Instrumentación y control

Siguiendo los objetivos establecidos para el equipo, el motor debe tener un control que le permita obtener arreglos de velocidades y sentidos de giro en diferentes períodos de tiempo.

4.4.1 Variador de frecuencia

El control de la velocidad y el sentido de giro del motor se realiza por medio de un variador de frecuencia *MagneTek* 606PC3 modelo DS022. Este controlador permite obtener la velocidad y sentido de giro deseados en un período de tiempo muy corto, pudiendo regular además las rampas de aceleración y desaceleración. Las especificaciones del variador de frecuencia son las siguientes:

Para CA de entrada

Voltaje	200-230 V
Frecuencia	50/60 Hz
Corriente	5.5 A

Para CA de salida

Voltaje	0-230 V max
Frecuencia	0-400 Hz
Fase	3 HP
Rango de Salida	5 A

Este variador de frecuencia permite que el usuario pueda controlar el motor de las siguientes tres formas:

- Directamente con el operador digital del variador.
- Por medio de un potenciómetro que va conectado a las terminales 8,9 y 10
- Por medio de programación externa que dará las indicaciones pertinentes al variador por medio de las terminales 1,2,3,4 y 5

Debido a que las condiciones de operación para este trabajo requieren de cambios rápidos de velocidades y sentido de giro con una mínima participación del usuario es necesario operar el variador de frecuencia por medio de programación externa. El principio de esta forma de operación se basa en el encendido y apagado de contactos, los cuales en este modo representan las velocidades y sentidos de giro permitidas. Las desventajas de estas condiciones son que no se permiten manejar más de tres velocidades y que el usuario debe indicar al variador las magnitudes de estas velocidades por medio del operador digital.

4.4.2 Controlador Lógico Programable

Una de las opciones para poder controlar de manera externa el variador de frecuencia es por medio de un controlador lógico programable (PLC). El PLC utilizado para este trabajo es de la marca Toshiba modelo EX14B representado en la figura 4.2. Sus especificaciones son :

Voltaje	100-120 V AC
Frecuencia	50/60 Hz

El Toshiba EX14B puede enviar y recibir señales de control a través de sus terminales de salida y entrada a las cuales cada dispositivo es alambrado individualmente. Esto lo hace basándose en un programa de diagrama de escalera, el cual le indica cuando activar y desactivar cada entrada o salida.

El PLC permite que un gran número de instrucciones puedan ser programadas. La memoria de programación tiene una capacidad de 1022 pasos y es del tipo CMOS RAM. Algunos ejemplos de las instrucciones que permite el PLC son: contactos normalmente abiertos, cerrados y transicionales, bobinas, timers, contadores, controles maestros, pasos secuenciales entre otros.

La unidad básica del PLC es el EX14B, ya que almacena el programa de escalera, monitorea señales de entrada y controla las señales de salida de acuerdo con el programa establecido. Esta unidad básica cuenta con ocho entradas y seis salidas. Maneja además dos tipos de entrada: 120 V(CA) y 24 V(CD).

El PLC puede tener unidades de expansión externas que permitan manejar un número mayor de entradas y salidas. Una herramienta externa a la unidad básica EX14B necesaria para el control es el programador de mano LCD, el cual cuenta con un pequeño teclado con las instrucciones del PLC y una pantalla de cristal líquido que permite al usuario la visualización de la programación. El LCD obtiene su suministro de energía del EX14B y su modo de transmisión de datos lo hace de forma serial (4800 bps).

La desventaja de programar la unidad básica EX14B con el programador LCD es que el primero solo es capaz de almacenar un programa de escalera que de hecho es con el que trabaja el PLC, por lo que si se requiere que el motor trabaje a otras condiciones se tiene que borrar el diagrama de la memoria de la unidad básica y volver a programar las nuevas condiciones con el LCD.

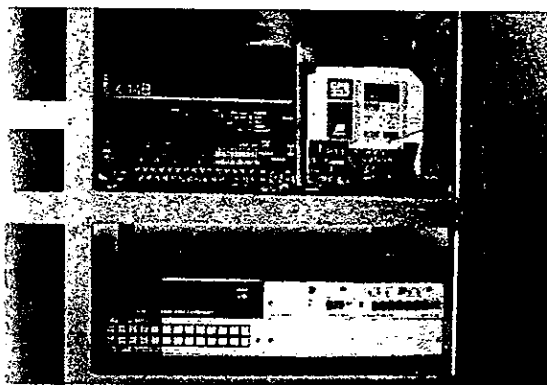


Fig. 4.2 Variador de Frecuencia y Controlador lógico

4.4.3 Conexión variador-PLC

Como se describió en los dos puntos anteriores para poder dar indicaciones externas al variador de frecuencia es necesario la activación y desactivación de las terminales que representan las velocidades y los sentidos de giro. Mientras que el principio de operación del PLC es la activación y desactivación de sus salidas siguiendo las instrucciones de un diagrama de escalera. Entonces es lógico pensar que las señales de salida del PLC sean los impulsos de entrada del variador.

La configuración interna del variador de frecuencia se muestra en la figura 4.3, se puede observar que las terminales T_1, T_2 y T_3 son las conexiones del variador con las terminales del motor, mientras que las terminales L_1, L_2 y L_3 son las terminales para el suministro de energía trifásica.

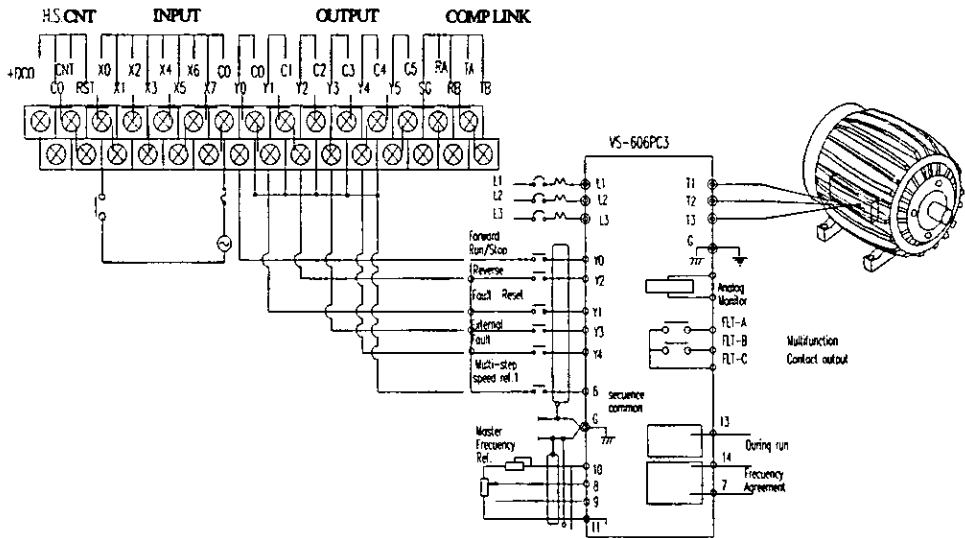


Fig.4.3 Conexiones entre el variador y el PLC

Fisicamente la conexión se hace con un alambrado uno a uno es decir, a cada entrada fisica del variador le corresponde una salida fisica del PLC. En la misma figura se muestran cuales fueron las correspondientes terminales fisicas entre ambos dispositivos y lo que representan.

4.4.4 Torquímetro

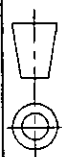
La medición de la potencia entregada al fluido por el sistema de agitación se realizó por medio de un torquímetro S. Himmelstein & CO conectado al motor por medio de un cople flexible. Las especificaciones del torquímetro son:

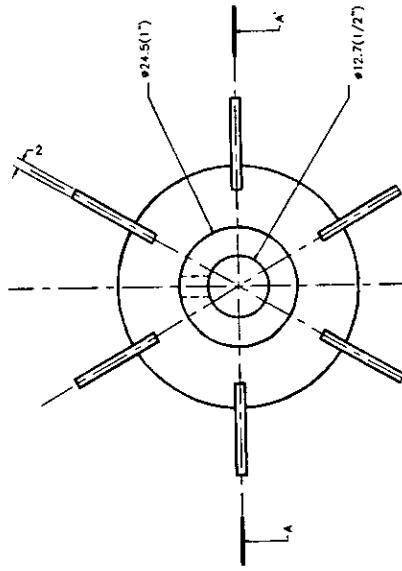
Modelo	MCRT 2801TN
RPM Máxima	15 000
Torque	0-25 (<i>lb-in</i>)

La ventaja de los torquímetros es que no sólo pueden adaptarse a mediciones de torque sino también para las de velocidad, fuerza, presión y flujo, que permiten la evaluación y control de motores, compresores, bombas, etc.

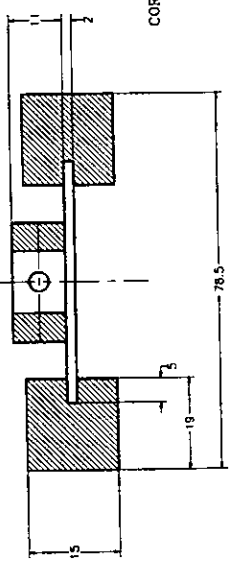
El torquímetro del equipo puede entregar las mediciones del torque y de la velocidad. Sin embargo, para los objetivos del trabajo sólo se hizo la medición del torque para la evaluación de la potencia. El despliegue de los datos obtenidos por el torquímetro se realizó por medio de un amplificador Himmelstein modelo 6603.

<p>NOTAS.</p> <p>1 PIEZA</p> <p>TODA LA ESTRUCTURA ESTA HECHA CON PTR DE 1 1/4"</p> <p>TODAS LAS MEDIDAS, SON INTERIORES.</p>	<div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p>UNIONES</p> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p>ENFRENE</p> </div>	<p style="text-align: center;">ES-2</p>	
<p>MATERIALES.</p> <p>SE INDICA EN LAS "NOTAS"</p>		<p>DIB No.: ES-01</p> <p>ACOT: mm. (plg.)</p> <p>DISEÑO: SHV/ASH</p>	<p>REVISO/PROBRO G. ASCANIO</p>
<p style="text-align: center;">CENTRO DE INSTRUMENTOS</p> <p>PROYECTO: MEZCLADOR PROGRAMABLE ESTRUCTURA PRINCIPAL</p> <p style="text-align: right;">DEPTO: DISEÑO MECANICO</p>		<p>ESC: SIN</p> <p>FECHAS: ABRIL 98</p> <p>DIBUJO: JUAREZ A.</p>	

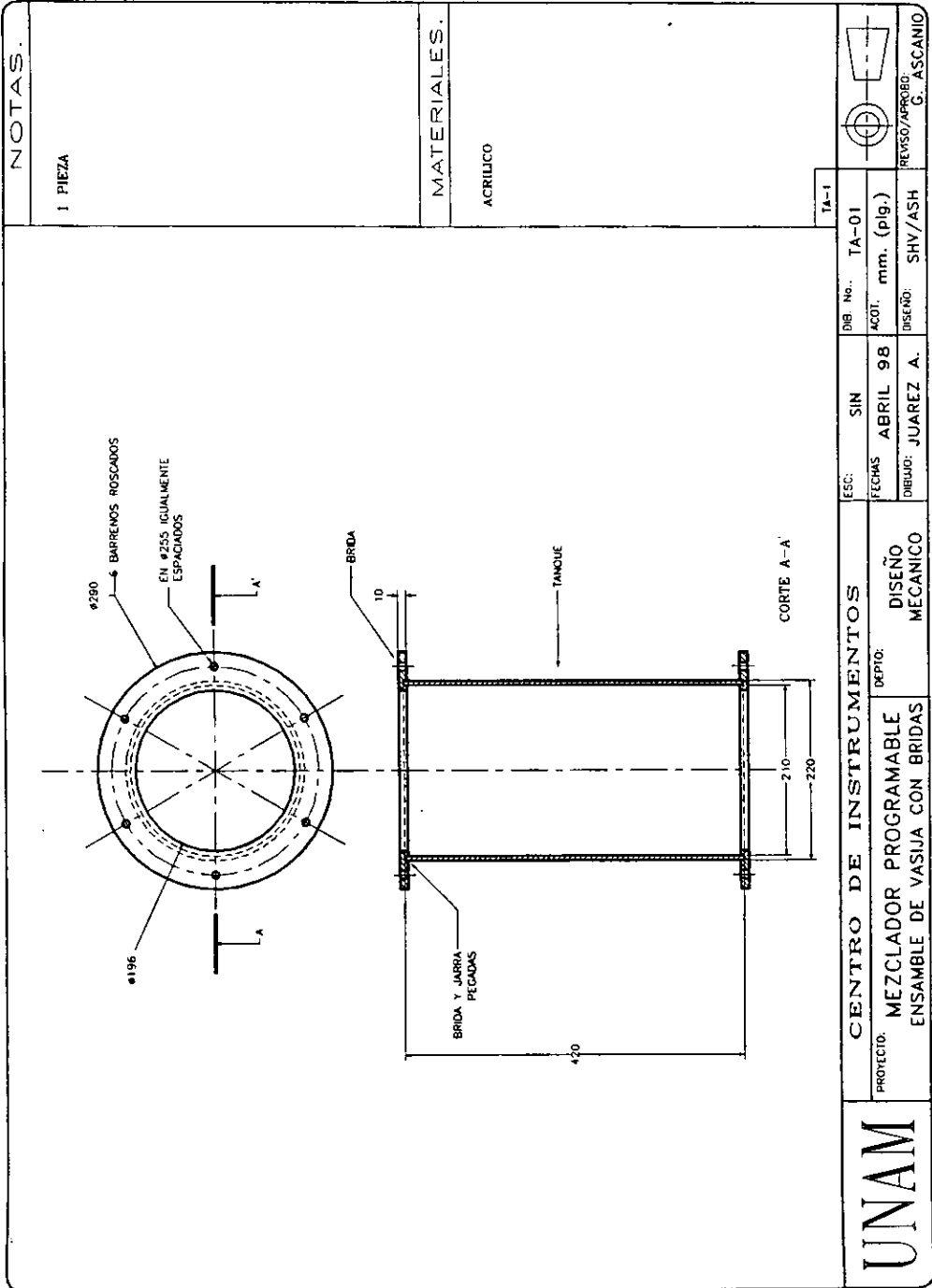
NOTAS.		MI-01	MI-01	DIB. No.:	MI-01	
				ACOT:	mm. (plg.)	REVISO/APROBADO
				DISEÑO:	SHV/ASH	G. ASCANIO
				ESC:	SIN	
				FECHAS:	ABRIL 98	
				DIBUJO:	JUAREZ A.	
				CENTRO DE INSTRUMENTOS	DISEÑO MECANICO	
				PROYECTO:	MEZCLADOR PROGRAMABLE	
				DEPTO:	TURBINA RUSHTON	
				UNAM		



Top view of a circular component with four radial slots. Dimensions include diameters of 24.5 (1 inch) and 12.7 (1/2 inch). Section lines A-A are shown.



CORTE A-A

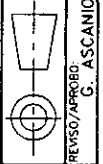


NOTAS.

1 PIEZA

MATERIALES.

ACRILICO



REVISO/APROBÓ:
G. ASCANIO

TA-1	DIB. No.	TA-01
	ACOT.	mm. (plg.)
	DISENÓ:	SHV/ASH

ESC: SIN

FECHAS: ABRIL 98

DIBUÓ: JUAREZ A.

DEPTO: MECANICO

UNAM

PROYECTO: MEZCLADOR PROGRAMABLE
ENSAMBLE DE VASIA CON BRIDAS

UNAM		CENTRO DE INSTRUMENTOS		ESC. SIN	DIB. No. TA-02		
PROYECTO: MEZCLADOR PROGRAMABLE		DEPTO: DISEÑO MECANICO		FECHAS: ABRIL 98	ACOT mm. (pulg.)	REVISO/APROBADO: G. ASCANIO	
TAPA SUPERIOR				DIBUJO: JUAREZ A.	ORSEN: SHV/ASH		
<p>6 BARENDOS PASANTES EN #290 IGUALMENTE ESPACIADOS</p> <p>CORTE A-A</p>							
<p>MATERIALES.</p> <p>ACERO INOXIDABLE</p>							
<p>NOTAS.</p> <p>1 PIEZA</p>							

Capítulo 5

Pruebas y análisis de resultados

Antes de mostrar los resultados, es necesario conocer bajo que condiciones de operación se realizaron las pruebas, los métodos, los materiales y sus características, así como el procedimiento que se siguió. En este capítulo se dan a conocer estas condiciones para después presentar los resultados y su análisis.

5.1. Propiedades del fluido

Con el objeto de conocer y analizar el comportamiento y tiempo de mezclado en un fluido puramente newtoniano, se escogió el glicerol grado industrial como fluido de trabajo cuya transparencia además, permite la adecuada visualización de los patrones de flujo al emplear la técnica ácido-base.

El glicerol industrial tiene las siguientes propiedades:

	μ <i>Kg/(m·s)</i>	ρ <i>kg/m³</i>
Glicerol	0.4605	1233.66

El dato de viscosidad fue obtenido mediante un reómetro rotacional comercial *Haake CV20*, utilizando una geometría de cilindros concéntricos. Hacer la medición en un reómetro, en realidad trata de establecer una relación

matemática bien definida, entre los esfuerzos y las velocidades de deformación creadas al hacer fluir un determinado material en condiciones específicas. Las geometrías clásicas que permiten establecer un flujo viscosimétrico son: cono y plato, y cilindros concéntricos. Si estas relaciones matemáticas se hacen en términos de variables medibles como torque y velocidad de rotación, entonces es posible estimar la viscosidad. En este caso y con el reómetro mencionado se obtuvo el gráfico de la figura 5.1 donde se presenta la viscosidad contra la velocidad de deformación.

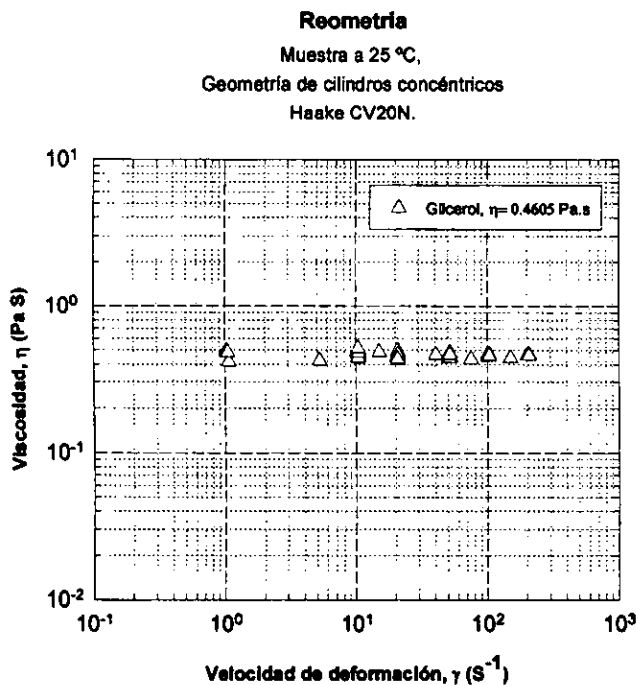


Fig. 5.1 Gráfico de viscosidad

5.2. Condiciones de operación

Para efecto de realizar las pruebas que en el siguiente subtema se mencionan, es necesario definir las condiciones geométricas y dinámicas a las cuales trabajó el equipo y se llevó a cabo la operación de mezclado.

5.2.1 Condiciones geométricas

Usualmente, los estudios sistemáticos se han realizado con configuraciones geométricas de agitación similares y/o proporcionales, cuyo objetivo es tener una base de comparación entre cada uno de los trabajos modificando otro tipo de variables mas no las geométricas o simplemente estudiando los patrones de flujo o características del mezclado bajo las mismas condiciones. La configuración geométrica estándar se muestra en la fig. 5.2.

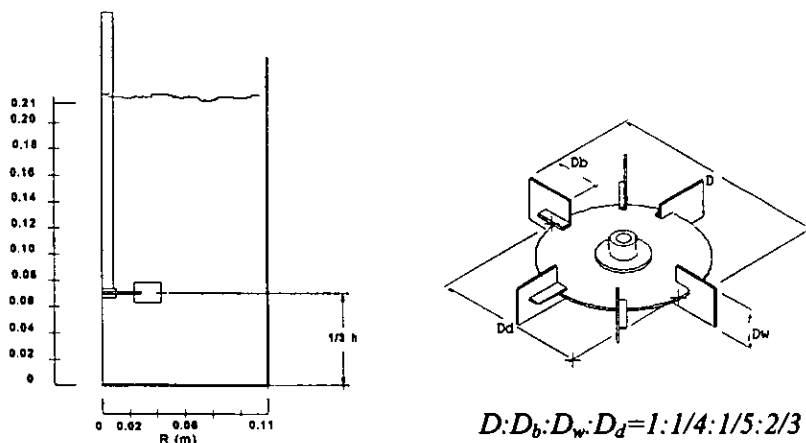


Fig. 5.2 Posición y dimensiones típicas del impulsor

Para este trabajo en particular, se respetaron las relaciones geométricas en cuanto a los diámetros del tanque y del impulsor que comúnmente se reportan en la literatura [4], pero se modificarán en cuanto a la posición de éste último. En la fig. 5.3 se muestran las configuraciones con las que se realizaron las pruebas mencionadas a continuación.

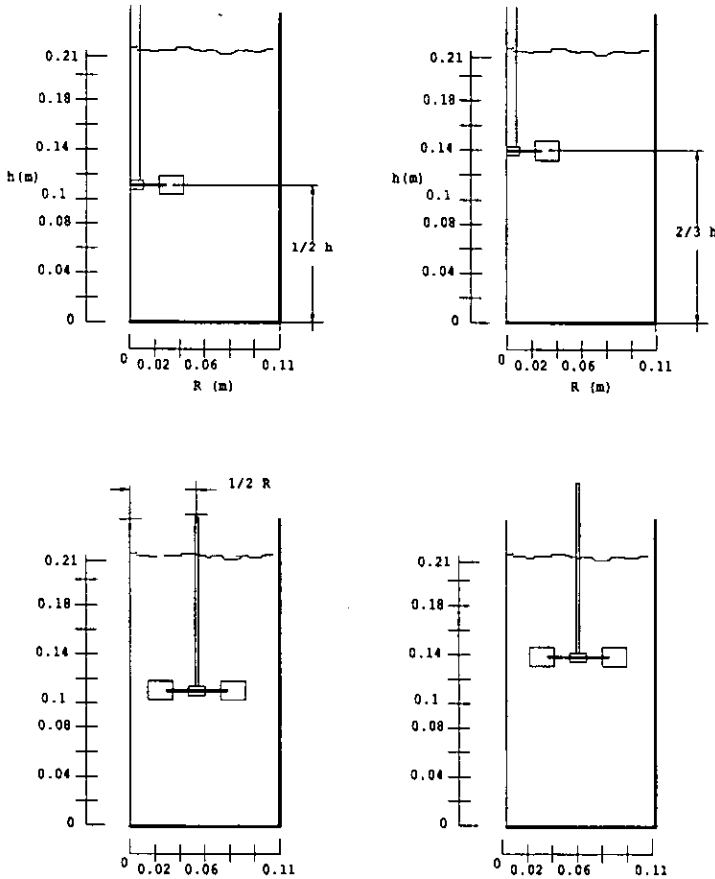


Fig. 5.3 Las cuatro configuraciones de posición empleadas

El tipo de perturbaciones geométricas fueron generadas por las siguientes condiciones:

- Por el cambio de posición axial del impulsor (paralelo al eje del tanque) de una configuración estándar de $\frac{1}{3}$ del diámetro del tanque, T , a partir del fondo de éste a una configuración de $\frac{1}{2}$ y $\frac{2}{3}$ de la altura h , que ocupan 7ℓ del fluido de trabajo medidos también a partir del fondo del tanque.
- Por el desplazamiento radial del agitador de la posición estándar concéntrico al tanque a una posición de $\frac{1}{4}$ del diámetro T , del tanque, para romper la simetría del sistema.
- Por la combinación de estas perturbaciones aunadas a las dinámicas.

5.2.2 Condiciones dinámicas

En el capítulo 4 de este trabajo se describe el equipo utilizado para efectuar los cambios dinámicos aplicados a la flecha del impulsor por el sistema motriz mediante un programa al controlador lógico. Estos cambios dinámicos cuyo objetivo es el de perturbar al sistema de agitación están dados por las siguientes condiciones:

- Por el cambio programado del sentido de giro del impulsor con velocidades distintas en función del tiempo
- Por la variación del tiempo de duración de cada velocidad de agitación,
- Por la combinación de estas condiciones.

Estos cambios programados de sentido de giro, velocidad y tiempo, fueron organizados en dos ciclos que se repiten n veces hasta lograr la homogeneidad esperada :

- Ciclo 1 (40 s)

20 segundos de agitación a 200 *rpm* en sentido *antihorario*

20 segundos de agitación a 400 *rpm* en sentido *horario*

- Ciclo 2 (27.5 s)

7.5 segundos de agitación a 200 *rpm* en sentido *antihorario*

20 segundos de agitación a 400 *rpm* en sentido *horario*

Para efectos de comparación, se realizaron 4 pruebas de referencia con distintas configuraciones geométricas pero sin ciclo (ciclo 0) mezclando a una velocidad constante de agitación de 400 *rpm* en un solo sentido como se realiza tradicionalmente.

Los impulsores de turbina están diseñados para trabajar a altas velocidades de agitación, (600 a 3000 *rpm*) que se traducen en altos números de Reynolds. Sin embargo, en el presente trabajo la turbina operó a dos velocidades bajas: 400 y 200 *rpm*. Se trabajó a estas velocidades para asegurar que el proceso se lleva a cabo bajo régimen laminar o en los primeros puntos de la región de transición, esto con el objetivo de estudiar los tiempos de mezclado para bajos números de Reynolds que generan un consumo de potencia menor

Las pruebas que se realizaron combinando los parámetros mencionados, se resumen en la tabla siguiente:

No. Prueba	Posición radial (medido a partir del centro del tanque)	Posición axial (medido a partir del fondo del tanque)	No. de Ciclo
1	0.0 cm	11.5 cm	1
2	5.75 cm	11.5 cm	1
3	5.75 cm	14.0 cm	1
4	0.0	14.0 cm	1
5 (ref.)	0.0	14.0 cm	0
6 (ref.)	0.0	11.5 cm	0
7 (ref.)	5.75 cm	11.5 cm	0
8 (ref.)	5.75 cm	14.0 cm	0
9	0.0	11.5 cm	2
10	0.0	14.0 cm	2
11	5.75 cm	11.5 cm	2
12	5.75 cm	14.0 cm	2

Tabla 5.1 Pruebas realizadas y sus condiciones de operación

Como puede notarse, las pruebas fueron organizadas en base a los ciclos, es decir, se tienen todas las combinaciones posibles en cuanto a condiciones geométricas para cada uno de los ciclos dando un total de 12 incluyendo las referencias con un ciclo 0, donde la velocidad y sentido de giro son constantes.

5.3. Procedimiento

El estudio del mezclado se ha visto limitado debido a las escasas herramientas con las que se cuenta, a pesar de que en los últimos años el número de investigaciones sobre el tema han aumentado, las limitaciones siguen existiendo. Debido a la importancia que tiene este trabajo en el tema de mezclado se describe a continuación el procedimiento que se siguió para la obtención de resultados.

5.3.1 Características del equipo auxiliar para el proceso

La medición del tiempo de mezclado en cada una de las pruebas es de forma cualitativa, es decir, sólo por inspección visual; sin embargo, para evitar problemas de criterio y de error humano en el momento de la realización de las pruebas fue necesario apoyarse en material de tipo audiovisual. En cada una de las pruebas se tomó película de vídeo (cámara Canon) y material fotográfico (135 *mm*, cámara Nikon) que permitieron el estudio de los tiempos de mezclado y patrones de flujo en momentos posteriores a la experimentación.

5.3.2 Técnica de visualización

La técnica de visualización para tiempos de mezclado utilizada en la experimentación es una técnica no intrusiva que se basa en una mezcla ácido-base-indicador, la cual permite observar de manera clara los patrones de flujo durante el proceso, así como la formación y destrucción de las zonas segregadas que permiten la medición del tiempo de mezclado.

Una vez montado todo el equipo con las condiciones requeridas, la técnica de visualización se puso en marcha. La primera parte de este método es la coloración del fluido, ésta se realiza por medio de una solución indicadora conocida como bromocresol púrpura. A pesar de que la incorporación del indicador no arroja resultados útiles sobre el tiempo de mezclado, se mezclaron manualmente 100 *ml* de bromocresol con 100 *ml* de glicerol para que el proceso no dependiera del punto de inyección. La incorporación del bromocresol se hizo con el equipo totalmente apagado, es por ello que se pudo observar en la parte superior del glicerol una película de la mezcla del glicerol y el indicador.

Aunque esta etapa de la técnica no arroja resultados cuantitativos, la primera prueba de coloración hecha con el equipo se realizó utilizando el ciclo 1 descrito en el apartado anterior. Esta parte del experimento sirvió para la visualización de los patrones de flujo ya que el glicerol estaba puro. En las pruebas posteriores el tanque se puso a trabajar a altas velocidades para

acelerar la incorporación del colorante al glicerol. Por medio de inspección visual se puede determinar si la mezcla tiene un grado de homogeneidad adecuado, que estará determinado cuando el fluido tome un color rojizo debido a la naturaleza del bromocresol.

Es recomendable que se deje un poco más de tiempo mezclando el glicerol con el indicador aún cuando se observe una coloración uniforme para evitar lo más que se pueda zonas segregadas que afectarían las mediciones del tiempo de mezclado. Cuando se determinó que la coloración tenía una homogeneidad aceptable se paró el equipo para adicionar una mezcla de 2 ml de NaOH con 2 ml de glicerol con el fin de dejar a la sustancia de trabajo en un medio alcalino. Nuevamente la primera prueba de la adición de base se realizó con el ciclo de programación 1 para observar los patrones de flujo y el comportamiento del fluido. En medio alcalino el glicerol tomó un color púrpura. Una vez que el fluido alcanzó este color se para el equipo para la adición posterior del ácido.

El tiempo de mezclado empieza a tomar significado en este momento y de manera más precisa con la adición de HCl, para ello se mezcló manualmente 4 ml de HCl con 4 ml de glicerol, esta mezcla es muy importante ya que una alta diferencia de densidades entre las sustancias provocaría que el tiempo de mezclado dependa del punto de inyección del HCl.

Una vez adicionado el ácido se puso en marcha el equipo; es muy importante que en esta etapa de la técnica se sigan las condiciones de operación definidas (ciclo 1, ciclo 2, ciclo 0). El tiempo de mezclado se midió tomando en cuenta el cambio de coloración de un medio básico en color púrpura a un medio alcalino en color amarillo.

El tiempo de mezclado tomado durante el proceso es comparado con el tiempo de mezclado obtenido por medio del vídeo para la misma prueba. La ventaja del utilizar vídeo es que permite observar el proceso *n* veces, brindando la oportunidad de tomar el tiempo de mezclado de una forma más precisa.

Debido a que el glicerol quedó con un exceso de ácido, el siguiente paso de la técnica ácido-base es la neutralización del fluido agregando 2 ml de NaOH ya que la relación de neutralización es 1:1. La ventaja de utilizar este tipo de métodos es que nos permite repetir un cierto número de pruebas sin la necesidad de cambiar el fluido. Para las pruebas siguientes se repite exactamente lo mismo aunque el fluido nunca recupera su transparencia inicial.

5.3.3 Medición del torque

En el capítulo 2 se mencionó la importancia del consumo de potencia en tanque agitados, en la teoría se tienen reportadas curvas de potencia (P_o vs Re) para las geometrías tradicionales que permiten la determinación del consumo de potencia. Para este trabajo fue necesario la medición del torque entregado por el sistema motriz al fluido para determinar el consumo de potencia durante nuestros procesos y la curva de potencia que indica el régimen en el cual se trabajó.

Para construir los gráficos de potencia para cada condición geométrica en el equipo (fig. 5.3), fue necesario hacer la medición del torque para diferentes velocidades de agitación desde 42 hasta 600 rpm. Para cada velocidad el sistema se dejaba estabilizar aproximadamente 15 min, con el fin de obtener una lectura confiable en el torque.

5.4. Resultados

5.4.1 Tiempo de mezclado

El tiempo de mezclado es uno de los macroparámetros que influyen en la eficiencia del mezclado y que fue el de mayor importancia para este trabajo. El objetivo de disminuir estos tiempos mediante la creación de flujos caóticos es cumplido y demostrado con los resultados que se presentan en la tabla 5.2 para después ser analizados de manera más particular.

No. Prueba	Posición radial	Posición axial, b	No. de ciclo	tm (min)
1	centro	1/2 h	1	5:08
2	descentrado	1/2 h	1	6:40
3	descentrado	2/3 h	1	12:08
4	centro	2/3 h	1	5:45
5	centro	2/3 h	0	42:11
6	centro	1/2 h	0	19:45
7	descentrado	1/2 h	0	9:42
8	descentrado	2/3 h	0	25:09
9	centro	1/2 h	2	2:52
10	centro	2/3 h	2	5:52
11	descentrado	1/2 h	2	2:49
12	descentrado	2/3 h	2	6:38

Tabla 5.2 Resumen de Tiempos de mezclado obtenidos con cada configuración propuesta.

El análisis de los tiempos obtenidos fue organizado de manera que pudieran ser comparados los efectos ocasionados por cada una de las configuraciones geométricas, (posición axial y radial del impulsor) y por el parámetro dinámico (ciclos). Estos efectos son descritos a continuación mediante las siguientes tablas y gráficos:

Parámetro de comparación: Posición axial
Condición de operación: Impulsor centrado

<i>No. prueba</i>	<i>ciclo</i>	<i>Posición axial</i>	<i>tm (min)</i>
1	1	1/2h	5:08
4	1	2/3h	5:45
6	0	1/2h	19:45
5	0	2/3h	42:11
9	2	1/2h	2:52
10	2	2/3h	5:52

Tabla 5.3 Efecto de la posición axial en el tiempo de mezclado

En la tabla 5.3. es evidente que la posición del impulsor a 2/3 de la altura del fluido tiene un efecto negativo en el tiempo de mezclado con respecto a una altura de 1/2 . Al comparar las pruebas 1 y 4 a las mismas condiciones dinámicas se tiene una diferencia que aunque mínima es notable y es confirmada por las pruebas 6-5 y 9-10 donde el tiempo disminuye a menos de la mitad trabajando a la altura media del fluido.

Las imágenes de la figura 5.4 muestran que con $1/2h$ los remolinos que se forman en prácticamente la totalidad del tanque favorecen el flujo convectivo que mezcla al fluido, mientras que para $2/3h$ estos remolinos son formados en la parte superior del tanque mientras que la inferior (debajo de los remolinos) el mezclado es realizado mediante difusión lo cual incrementa el tiempo total del mezclado.

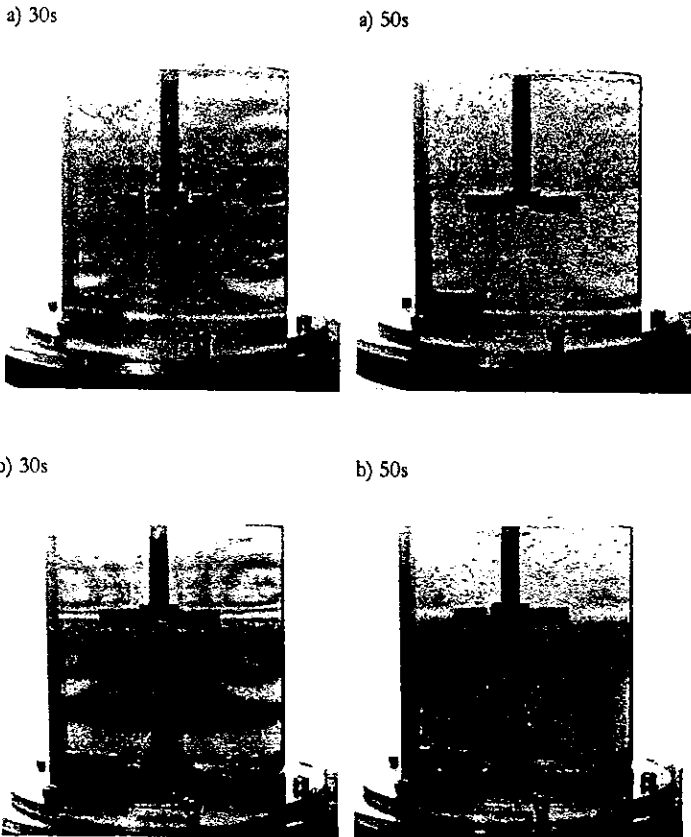


Fig. 5.4 Efecto de la posición axial en el tiempo de mezclado con el impulsor centrado y operando con el ciclo 1, a) $1/2h$ y un tiempo de 30s y 50s; b) $2/3h$ y a 30 y 50s.

El efecto de la posición radial es mostrado en la tabla 5.4. a una altura b constante de $1/2h$ que de acuerdo a la tabla anterior resultó ser la posición axial con tiempos de mezclado menores. Los tiempos resultantes serán discutidos posteriormente y analizados mediante las figuras 5.6 y 5.7 .

Parámetro de comparación: Posición radial

Condición de operación: $b=1/2h$

<i>No. Prueba</i>	<i>ciclo</i>	<i>Posición radial</i>	<i>tm (min)</i>
1	1	centrado	5:08
2	1	descentrado	6:40
6	0	centrado	19:45
7	0	descentrado	9.42
9	2	centrado	2:52
11	2	descentrado	2:49

Tabla 5.4 Efecto de la posición radial en el tiempo de mezclado

Al comparar las pruebas 1-2 y 9-11 se nota una diferencia que resulta poco significativa en los tiempos de mezclado cuando hay un ciclo de por medio. Entre las pruebas 1 y 2 existe una diferencia de un poco mas de 1:30 min., siendo la de mayor tiempo la de posición fuera del centro. Entre las pruebas 9 y 11 la diferencia de tiempos es prácticamente despreciable. Cuando no hay una perturbación dinámica (ciclo 0), en la prueba con el impulsor centrado los tiempos de mezclado se ven afectados por la formación de zonas segregadas bien definidas que no se presentan cuando el impulsor se encuentra descentrado facilitando la homogeneización en un tiempo menor.

En las figuras 5.5 y 5.6 se presentan las secuencias del comportamiento del fluido bajo las mismas condiciones de operación con excepción de la posición radial del impulsor.

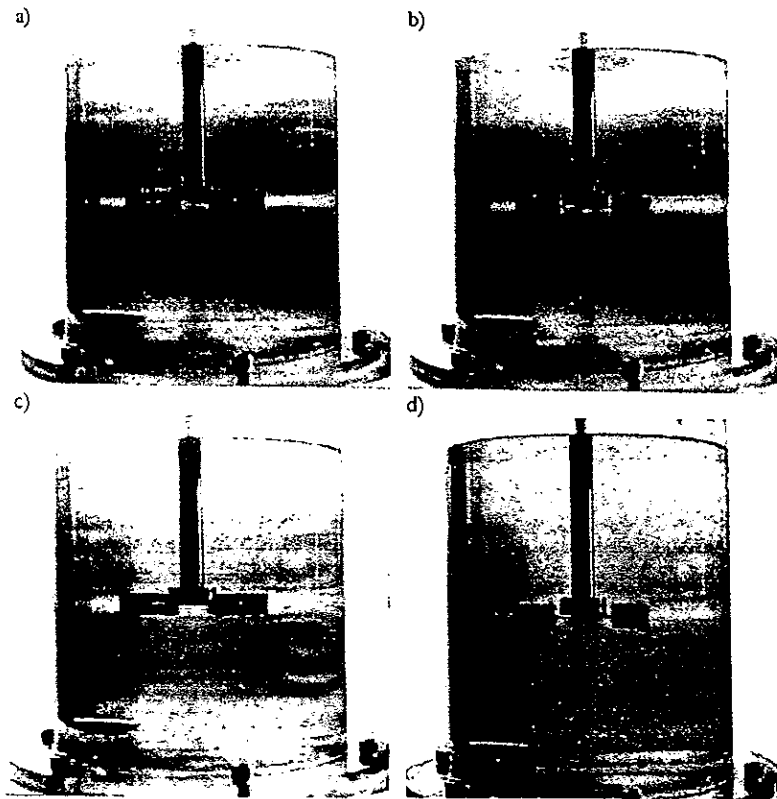
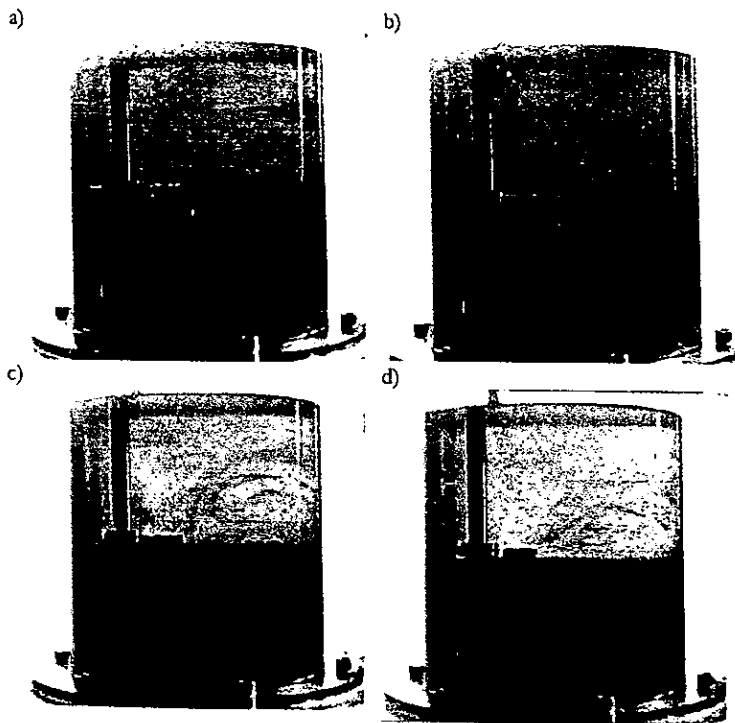


Fig. 5.5 Secuencia de imagenes del glicerol cuando 1/2h y con eje del impulsor centrado, a) 47 s, b) 56 s, c) 1:24 min. d) 2:05.min

El comportamiento del fluido en dos dimensiones con el eje del impulsor en el centro del tanque presenta cuatro remolinos en los primeros momentos de operación bajo una velocidad, los cuales transcurrido un periodo relativamente corto de tiempo se convierten en zonas segregadas hasta que son destruidas rápidamente cuando es utilizado un ciclo que perturbe el sistema o eliminadas mediante difusión en la ausencia de perturbaciones dinámicas en un periodo de tiempo mucho mayor.



*Fig. 5.6. Secuencia de imágenes del glicerol cuando $1/2h$ con eje del impulsor descentrado
a) 42 s, b) 53 s, c) 1:22 min. d) 2:00 min.*

La secuencia de la fig. 5.6 con el impulsor fuera del centro muestra la formación de dos zonas de mezclado claramente definidas donde el mezclado en la parte superior se realiza por convección, mientras que la parte inferior logra homogeneizarse mediante mecanismos de convección y difusión en un tiempo mayor.

La tabla 5.5 muestra los tiempos de mezclado cuando el impulsor se encuentra a una altura de 2/3. Los tiempos de mezclado para estas condiciones de operación presentan un comportamiento un poco parecidos a los resultados de la tabla 5.4. Por ejemplo, para las pruebas que trabajaron con el ciclo 1 se obtuvo un tiempo menor para las condiciones simétrica; así mismo, para las pruebas 10 y 12 con el ciclo de operación 2, la diferencia de tiempos es muy pequeña. En ausencia de perturbaciones dinámicas bajo condiciones simétricas los tiempos de mezclado nuevamente se ven afectado por la formación de zonas segregadas que ocasionan un tiempo de mezclado significativamente mayor al tiempo obtenido para condiciones asimétricas.

Parámetro de comparación: **Posición radial**

Condición de operación: 2/3 h

<i>No Prueba</i>	<i>Ciclo</i>	<i>Posición Radial</i>	<i>tm (min)</i>
4	1	centrado	5:45
3	1	descentrado	12:08
5	0	centrado	42.11
8	0	descentrado	25:09
10	2	centrado	5:52
12	2	descentrado	6:38

Tabla.5.5. Efecto de la posición radial

Después de haber analizado el efecto de las perturbaciones geométricas, a continuación se muestran los tiempos de mezclado obtenidos para cada una de las condiciones dinámicas, siendo éstas las de mayor impacto en la reducción de los tiempos totales de homogeneización.

Parámetro de comparación: **Ciclo**

Condiciones de operación: **Centrado, ½ h**

No. de Prueba	No. Ciclo	tm (min)
1	1	5:08
6	0	19:45
9	2	2:52

Tabla 5.6 Efecto del ciclo en el tiempo de mezclado

Parámetro de Comparación: **Ciclo**

Condiciones de Operación: **Fuera del centro, ½ h**

No. de prueba	No. Ciclo	tm (min)
2	1	6:40
7	0	9:42
11	2	2::49

Tabla 5.7 Efecto del ciclo en el tiempo de mezclado

En ambos casos se aprecia que sí el sistema es agitado bajo las condiciones tradicionales ($N=cte$ y en un solo sentido de giro), la homogeneidad se alcanza en un periodo significativamente mayor que cuando se utiliza un ciclo de perturbación dinámica (ciclo 1, ciclo 2) . Sin embargo, debido a que el ciclo 2 provoca un número mayor de perturbaciones que el ciclo 1 en el mismo

periodo de tiempo, la reducción de los tiempos de mezclado para las pruebas que operaron bajo el ciclo 2 son menores en casi un 50% de los tiempos obtenidos para el ciclo 2.

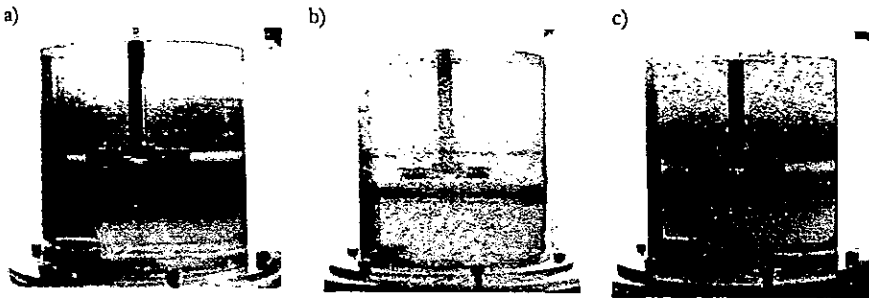


Fig. 5.7 Visualización del mezclado en glicerol en un tiempo de operación de un minuto para $b=1/2h$ y eje centrado, a) Ciclo 1, b) Ciclo 0, c) Ciclo 2.

En las imágenes a) y c) de la figura 5.7 correspondientes a condiciones de operación geométricas iguales, se observan claramente dos zonas segregadas bien definidas en la zona superior e inferior del impulsor después de que el fluido se estabiliza a una cierta velocidad. Las zonas segregadas correspondientes a la imagen c) que trabajó con el ciclo 2 se observan más claras que las de la imagen a) bajo el ciclo 1, ya que a un mismo tiempo, la mezcla con el ciclo 2 sufre de más perturbaciones que favorecen a una mayor transferencia de masa. Comparando el patrón seguido por estas dos pruebas con respecto al representado con la imagen b), el cual operó a 400 rpm constantes, se puede pensar en primera instancia que el mezclado bajo estas condiciones de operación resulta mejor, ya que las zonas segregadas son más pequeñas, sin embargo, el tiempo en el que las zonas segregadas permanecen sin poder mezclarse es mucho mayor al tiempo de mezclado final obtenido de las otras dos pruebas.

5.4.2 Consumo de potencia

El segundo macroparámetro que caracteriza el análisis de los tanques de mezclado es el consumo de potencia. Una vez obtenida la potencia es factible de construir una curva P vs. N , la cual permite identificar el régimen de flujo en el que se está trabajando.

Mientras en este gráfico se mantenga un exponente de 2 en la curva se asegura que se está trabajando en un régimen laminar, así para los datos obtenidos en las cuatro configuraciones geométricas a las que se trabajó se tienen las curvas de las figuras 5.8 y 5.9.

En estas gráficas se obtuvo una regresión no lineal en los puntos de interés ($2.37 < N < 7.60$ rpm) del tipo $y = ax^b$, donde b es el índice que indica las condiciones de flujo, siendo laminar para $b \leq 2$ y $b > 2$ para el régimen de transición. De los gráficos se puede observar que la regresión de los primeros puntos (considerando la velocidad de 200 rpm) para el impulsor descentrado (figura 5.8) se tiene una b un poco mayor al límite de 2, por lo que se deduce que a 200 rpm el equipo trabajó en régimen de transición, a su vez con mayor razón se asegura que a 400 rpm el fluido también está en este régimen. Manteniendo el impulsor centrado para las dos posiciones axiales, la regresión de los primeros puntos en ambos casos dieron una b muy aproximada a 2, de acuerdo a esto se deduce que a 200 rpm, bajo estas consideraciones de operación, nos encontramos en régimen laminar pero muy cerca de la región de transición.

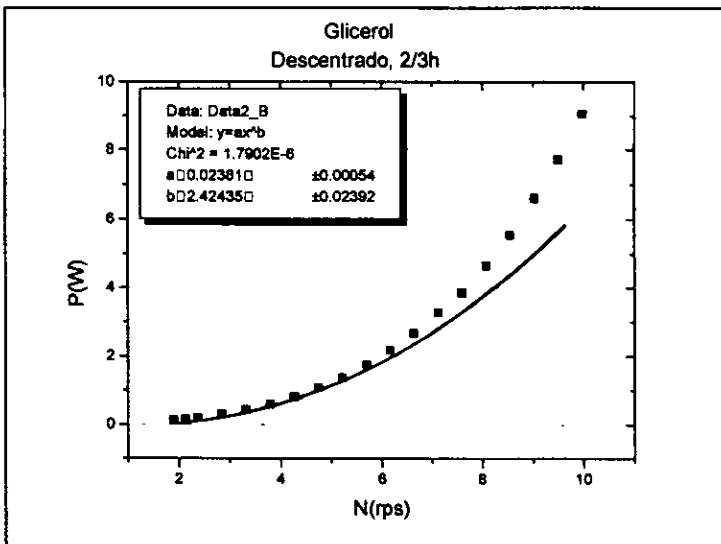
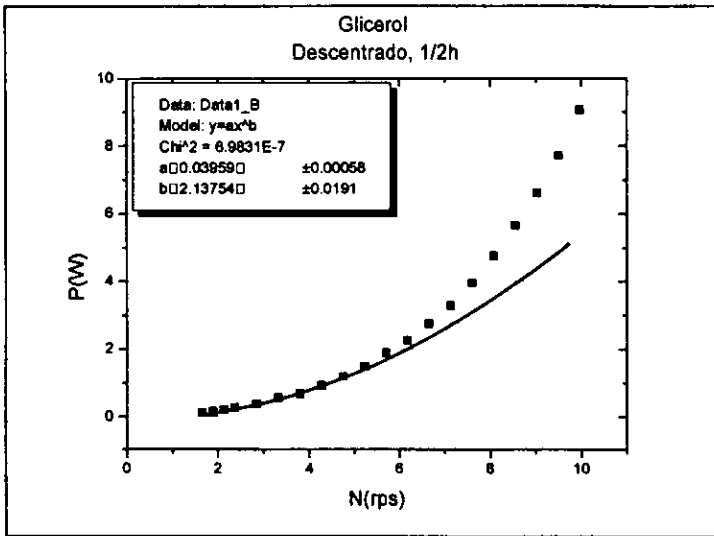


Fig. 5.8 Gráficos P vs N para impulsor descentrado.

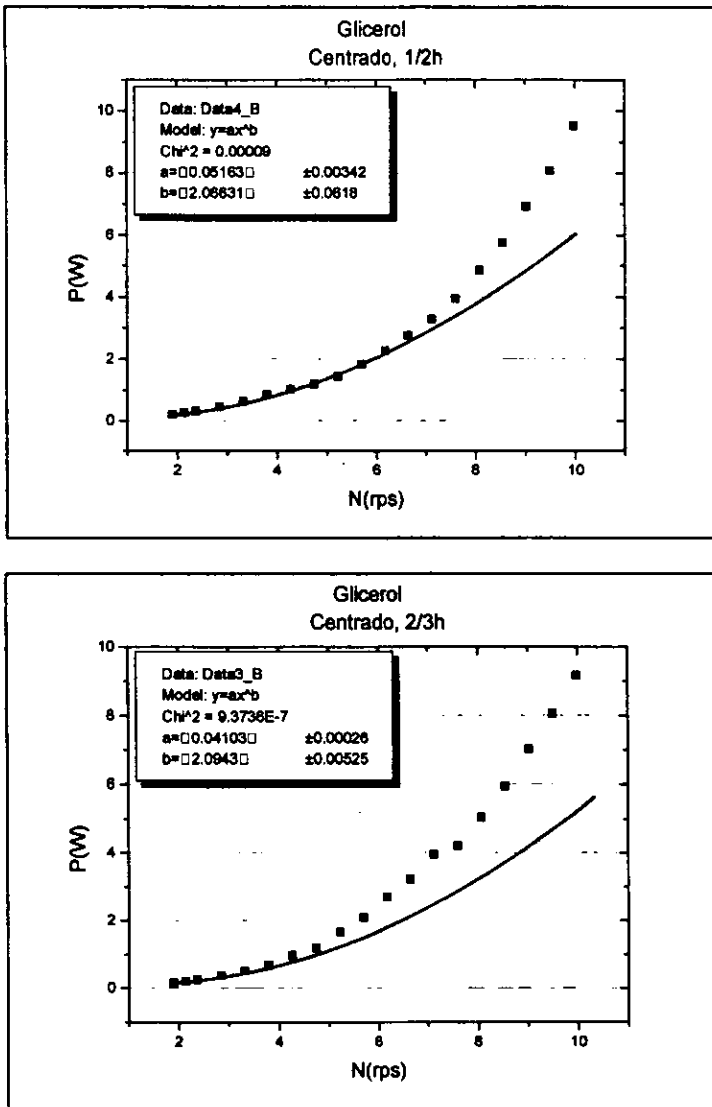


Fig.5.9 Gráficos P vs N con impulsor centrado.

La tabla 5.8. presenta los datos teóricos para la configuración geométrica tradicional y los datos experimentales del consumo de potencia para las cuatro configuraciones propuestas.

rpm	Potencia(W)				
	Configuración tradicional	Descentrado 1/2h	Descentrado 2/3h	Centrado 2/3h	Centrado 1/2h
200	0.531	0.547	0.429	0.510	0.625
400	4.031	2.738	2.663	3.211	2.738

Tabla 5.8 Datos teóricos y experimentales del consumo de potencia

En la literatura se encuentran reportadas las curvas de potencia (P_0 vs. Re) para geometrías de agitación tradicionales. En este caso, a partir de la figura 5.10 es posible obtener el consumo de potencia mediante P_0 definido por la ecuación 2.8 donde P es la potencia en Watts entregada al fluido y que es comparada con la potencia calculada de las gráficas correspondientes a las figuras 5.8 y 5.9 para distintas configuraciones geométricas. El análisis comparativo de la potencia se realiza a partir de los datos obtenidos para las dos velocidades de agitación con las que se trabajó, es decir 200 y 400 rpm.

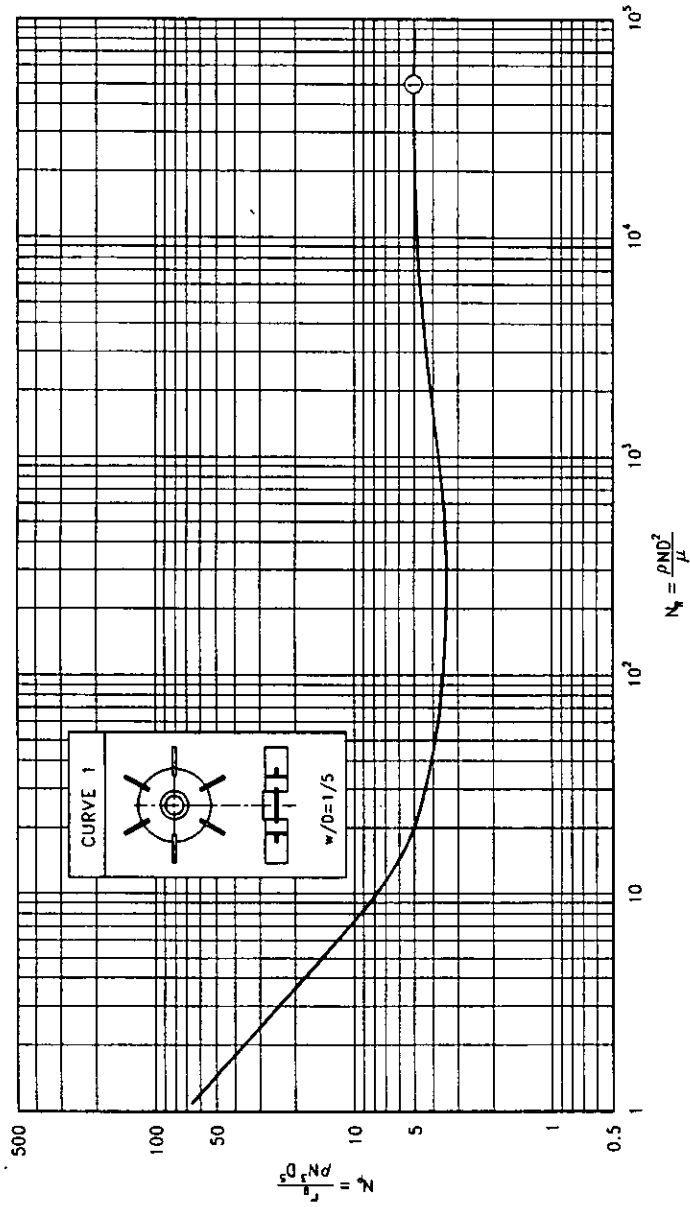


Fig. 5.10 Datos de consumo de potencia de Bates et al., I.&E.C. Proc.Des.Dev., Vol.2, No.4, pp 310-314 (1963)

La gráfica de la figura 5.11 muestra los datos de consumo de potencia reportados en la literatura para condiciones de agitación tradicionales y las obtenidas para las condiciones de este trabajo. Es notorio que para el Re correspondiente a 400 rpm la potencia consumida está por debajo de la curva teórica, mientras que el Re de 200 rpm permanece prácticamente igual.

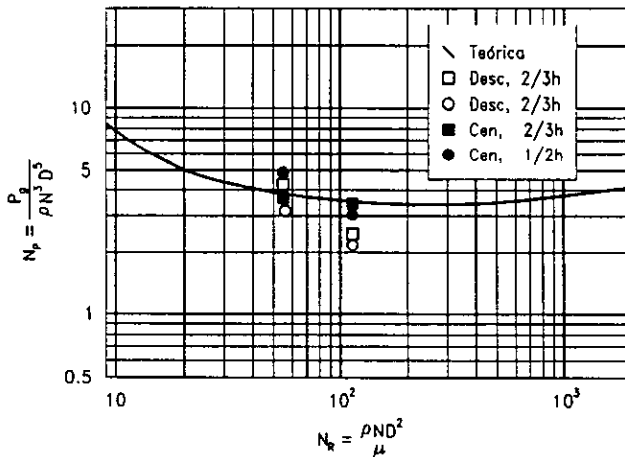


Fig. 5.11 Consumo de potencia teórica y experimental a 200 y 400 rpm

5.4.3 Energía de mezclado

Los datos de potencia obtenidos en la experimentación se hacen mediante el monitoreo del torque que el equipo le entrega al fluido. El torquímetro y el amplificador necesitan de un periodo de tiempo para poder estabilizar la señal y dar una lectura confiable. Debido a las perturbaciones dinámicas generadas por el cambio de velocidad y sentido de agitación del impulsor el torquímetro tiene para el ciclo 1 solo 20 s en ambos sentidos para poder estabilizarse, mientras que para el ciclo 2 sólo se cuentan con 7.5 s para estabilizarse en

sentido antihorario y 20 s en horario. Cuando el mezclador está trabajando bajo un ciclo, la lectura del amplificador se incrementa hasta tener un torque limite para la primera velocidad y el sentido de giro, en el momento en que la flecha de agitación cambia la velocidad y la dirección, los datos observados en la carátula del amplificador se decremantan rápidamente pasando por cero hasta llegar a un valor de torque estable pero negativo (el signo negativo indica el cambio de sentido de giro), que corresponde al aplicado a la nueva velocidad y sentido. Debido a la forma de transformar las señales el amplificador no distingue un punto crítico en el torque en el momento exacto de la perturbación. El tiempo que tarda el amplificador para dar una señal constante después del cambio es de aproximadamente 6.5 s.

Para el cálculo de las potencias se asumió que el torque desplegado a 6.5 s después de la perturbación es constante durante el periodo de tiempo en que se mantiene operando el impulsor a una cierta velocidad y sentido.

A partir de la potencia es posible obtener la energía de mezclado que de manera general está definida por:

$$E_m = P \times t_m \tag{5.2}$$

Al trabajar con un ciclo la energía puede definirse como:

$$E_m = P t_m |_{200} + P t_m |_{400} \tag{5.3}$$

Donde el t_m es el tiempo total de mezclado en el que el impulsor trabajó para cada una de las velocidades de operación a 200 ó 400 rpm. De esta form, en la tabla 5.9 se muestran los datos obtenidos de energía de mezclado para cada prueba.

Al ser la energía de mezclado una función directa del tiempo, resulta evidente que la energía de mezclado para las pruebas en las cuales se operó bajo una velocidad y sentido de giro constante (5-8) resultaran más grandes que en las pruebas donde se operó con perturbaciones dinámicas.

<i>Prueba</i>	<i>Posición axial</i>	<i>Posición radial</i>	<i>Ciclo</i>	<i>E_m (J)</i>
1	1/2h	centrado	1	556.82
2	1/2h	descentrado	1	657.00
3	2/3h	descentrado	1	1116.55
4	2/3h	centrado	1	406.77
5	2/3h	centrado	0	6929.87
6	1/2h	centrado	0	3805.03
7	1/2h	descentrado	0	1594.03
8	2/3h	descentrado	0	4018.46
9	1/2h	centrado	2	617.53
10	2/3h	centrado	2	1154.17
11	1/2h	descentrado	2	544.213
12	2/3h	descentrado	2	1208.28

Tabla. 5.9 Datos experimentales de energía de mezclado

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Conclusiones

El objetivo principal del presente trabajo de tesis fue reducir los tiempos de mezclado para fluidos newtonianos de mediana viscosidad a bajos números de Reynolds (<500), con perturbaciones dinámicas (arreglos de velocidad, sentido de giro y tiempo) y condiciones asimétricas del impulsor con respecto a la vasija.

Se desarrolló un tanque agitado capaz de generar las perturbaciones dinámicas automáticamente por medio de un controlador programable además, el equipo cuenta con un tornillo deslizante que permite desplazar el sistema motriz y una plataforma de elevación, mecanismos que provocan el rompimiento de la simetría en las configuraciones geométricas de tanques agitados tradicionales.

Las hipótesis planteadas se cumplieron al reducirse los tiempos de mezclado para los diferentes tipos de perturbaciones como a continuación se explica.

El efecto de las perturbaciones dinámicas en las pruebas que conservan similitud geométrica fue la reducción de los tiempos de mezclado. Las pruebas que operaron a una velocidad de agitación constante de 400 *rpm* en sentido antihorario tuvieron un tiempo de mezclado mucho mayor con respecto a aquellas que utilizaron velocidades y sentidos de giro dependientes del tiempo (ciclo 1 y ciclo 2). La reducción del tiempo de mezclado utilizando un ciclo de perturbación dinámica es en promedio del 75% para todas las pruebas. El dato más significativo ocurrió cuando el impulsor trabajó centrado y a una altura de 2/3 de la altura total del fluido, ya que trabajando el tanque con el ciclo de

perturbación 1 se obtuvo un tiempo de 5:45 min, mientras que para las condiciones de velocidad tradicionales (sin ciclo) se obtuvo un tiempo de 44:11 min, obteniendo una reducción de casi el 90%

El tiempo de mezclado depende a su vez del arreglo entre la velocidad y sentido de giro del impulsor con respecto al tiempo. La diferencia entre el ciclo 1 y el ciclo 2 es que en el último la velocidad de operación más baja (200 rpm, sentido *antihorario*) trabajó durante un periodo de tiempo más corto que en el ciclo 1, lo cual implicó la generación de más perturbaciones, obteniéndose para las pruebas que trabajaron con el ciclo 2 tiempos de mezclado más pequeños en casi un 50% del valor del tiempo obtenido para las pruebas con el ciclo 1.

El efecto de la posición axial para las pruebas que trabajaron a una posición radial constante y el mismo ciclo fue desfavorable en todas los casos cuando el impulsor se localizó a 2/3 de la altura del fluido. El tiempo de mezclado en todos estos casos es mayor en casi un 50% en comparación con los procesos que operaron con el impulsor a 1/2

La posición excéntrica del impulsor redujo considerablemente los tiempo de mezclado en las pruebas que operaron a velocidad y sentido de giro constante para las dos posiciones axiales propuestas. En contraste, los procesos que trabajaron con el ciclo de perturbación 1, el tiempo de mezclado fue menor cuando el impulsor se encontró centrado, mientras que en las pruebas con ciclo 2 los tiempos de mezclado fueron muy similares para las dos posiciones radiales propuestas. Una desventaja de localizar al impulsor fuera del centro, es que se crean dos mecanismos de mezclado: convección y difusión.

Comparando los resultados obtenidos de las 12 pruebas propuestas para el glicerol grado industrial ($\mu = 0.4605 \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$ y $\rho = 1233.66 \text{ Kg/m}^3$), los mejores tiempos de mezclado se obtuvieron bajo las siguientes condiciones:

- | | | | |
|--------|------------------|---------|--------------------------|
| • 1/2h | fuera del centro | ciclo 2 | $t_m = 2:49 \text{ min}$ |
| • 1/2h | centrado | ciclo 2 | $t_m = 2:52 \text{ min}$ |

A partir de estos resultados, cuando se opere un proceso de mezclado con una turbina a nivel laboratorio sería conveniente trabajar con las siguientes condiciones:

- El impulsor localizado a una altura de $\frac{1}{2}$ de la capacidad volumétrica del fluido de trabajo.
- Tener arreglos de velocidades y sentidos de giro dependientes del tiempo siendo aún más favorable cuando éstos permitan la generación de más perturbaciones en periodos pequeños de tiempo que provocaran una mejor transferencia de masa dentro del tanque.

La desventaja del análisis del tiempo de mezclado es subjetivo ya que depende del grado de homogeneidad deseado y del tipo de trazador que se utilice para su estudio. A pesar de ello, estos primeros resultados para procesos de mezclado corroboran la reducción significativa de los tiempos bajo perturbaciones geométricas y dinámicas. Estos resultados son un muy buen comienzo para futuras investigaciones sobre tanques agitados que enriquecerán un poco más los procesos de mezclado desde el punto de vista de la mecánica de fluidos y de la industria química.

Bibliografía

1. Archard, A. and Boisson, H.C. *Numerical simulation of newtonian and viscoelastic 2D laminar mixing*. Récents Progrès en Génie des Procèdes. Vol II, No. 51, (1997), 259-264
2. Aref, H. *Stirring by chaotic advection*. Journal of fluid mechanics. Vol 143, (1984), 1-21.
3. Bakker, A and Leng, D. *Pinpoint mixing problems with lasers and simulation software*. Chemical Engineering. Vol.101, (1994), 94-100.
4. Bakker, A., Myers, K.J. and Ward, R.W. *The laminar and turbulent flow pattern of a pitched blade turbine*. Trans I Chem Eng. Vol. 74, (1996).
5. Bjorn, L. *Bioprocess engineering systems, equipment and facilities*. Wiley Interscience publication, 805 pp.
6. 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.
7. Brito de la Fuente, E., Leuliet, J.C., Choplin, L. and Tanguy, R.A. *On the role of elasticity on mixing with a helical ribbon impeller*. Trans I Chem Eng. Vol. 69, (1991).

8. Brito de la Fuente, E., Leuliet, J.C., Choplin, L and Tanguy, R.A. *On the effect of shear-thinning behavior on mixing with a helical ribbon impeller*. AIChE Symposium Series. Vol. 88, No.286 (1992), 27-32.
9. Brown, D.E. *The measurement of fermenter power input*. Chem. Ind. 16. (1977), 684-688.
10. Fluent Incorporation. *Fluent, FDI and poliflow bringing you the test in CFD software*. Vol. 5, No. 2 (1996).
11. Franjione, J., Leong, Ch. and Ottino, J. *Symmetries within chaos: A route to effective mixing*. Physics Fluids. Vol. 1, No. 11 (1989), 1772-1782.
12. Galindo, E., Qintero, R. and López, A. *Mezclado y Transferencia de oxígeno en fermentadores*. Escalamiento de procesos biotecnológicos. Universidad de las Naciones Unidas. Tokio, Japón (1995).
13. Galindo, E., Arguello, M., Velasco, D., Albitzer, V., and Martínez, A.. *Comparison of cavern development in mixing a yield stress fluid in Rushton and Intermig impellers*. Chemical Engineering Technology. Vol. 19 (1996), 315-323.
14. Galindo, E. and Nienow, A. *Mixing of highly viscous simulated xanthan fermentation broths with the lightnin A-315 impeller*. Biotechnol. Prog. Vol. 8 (1992), 233-239.
15. Galindo, E. and Nienow, A. *Performance of the scaba 6SRGT agitator in mixing of simulated xanthan gum broths*. Chemical Engineering Technology. Vol. 16 (1993), 102-108.
16. Geankoplis, C. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. The Ohio State University. Editorial Continental (2ª. Edición), pp 759.

17. Hjertager, B.H. and Morud, K. *Computational fluid dynamics simulation of bioreactors*. International Symposium on Bioreactor Performance. (1995), 47-61.
18. Hjorth, S. *On the laminar to turbulent transition in mixing vessels*. Récents Progrès en Génie des Procédés. Vol. II, No.51 (1997), 43-50.
19. Holland, I.A. and Chapman, F.S. *Liquid mixing and processing in stirred tanks*. Reinhold Pub., New York.
20. Kaminoyama, M., Saito F. and Kamiwano, M. *Numerical analysis of three dimensional flow of a pseudoplastic liquid in stirred vessel with a turbine impeller*. International Chemical Engineering. Vol 30, No. 4 (1990).
21. King, R.L., Hiller, R.A. and Tatterson, G.B. *Power Consumption in a mixer*. AIChE Journal. Vol. 34, No.3 (1998).
22. Kuboi, R., Nenow, A. and Allsford, K. *A multipurpose stirred tank facility for flow visualization and dual impeller power measurement*. Chem. Enmg. Comm. Vol. 22 (1993), 29-39.
23. Lamberto, D.J., Muzzio, F.J. and Swanson, P.D. *Using time dependent rpm to enhance mixing in stirred vessels*. Chemical Engineering Science. Vol 51, No. 5 (1993), 733-741.
24. Leong, C.W. and Ottino, J.M. *Experiments on mixing due to chaotic advection in a cavity*. Journal Fluid Mechanics. Vol 209 (1989), 463-499.
25. Litt, M. *Rheology: Past, present and future*. Chemical Engineering Progress. (1989), 54-60.
26. Mavros, P., Xuereb, C. and Bertrand, J. *Effect of radial or axial impeller and liquid viscosity on energy dissipation in agitation vessels*. Récents Progrès en Génie des Procédés. Vol II, No.51 (1997), 259-264.

27. Metzner, A.B. and Taylor, J.S. *Flow patterns in agitated vessels*. AIChE Journal. Vol 6, No. 1 (1960) , 109-115.
28. Midoux, M. and Charpentier, J.C. *Mechanically agitated gas liquid reactors (Hydrodynamics)*. International Chemical Engineering. Vol 24, No. 2 (1984), 249-287).
29. Nienow, A. and Edwards, M. *Introduction to mixing problems*. Mixing in the process industries. Series in Chemical Engineering. Chapter 1, 1-22.
30. Nienow, A. and Miles, D. *A dynamometer for the accurate measurement of mixing torque* . J.Sci. Inst. Series 2, No. 2 (1969), 994-995.
31. Norwood, K. And Metzner, A. *Flow patterns and mixing rates in agitated vessels*. AIChE Journal, (1960), 432-437.
32. Oldshue, J.Y. *Fermentation mixing scale-up techniques*. Biotechnology and bioengineering. Vol . VIII (1966), 3-24.
33. Oldshue, J.Y. *Power correlations and the effects of mixing enviroment*. Fluid mixing technology. Chapter 3. Chemical Engineering, McGraw Hill (1983), 43-71.
34. Reséndiz, R., Martínez, A., Ascanio, G. and Galindo, E. *A new pneumatic bearing dynamometer for power input measurement in stirred tanks*. Chemical Engineering Technology. Vol 14, 105-108.
35. Serrano, L. and Galindo, E. *Studies on cavern development in mixing a yield stress fluid in a pitot-scale proto-fermenter*. Instituto de Biotecnología.
36. Swanson, P.D. and Ottino, J.M. *A comparative computational and experimental study of chaotic mixing of viscous fluids*. Journal fluid mechanics. Vol.213 (1990), 227-249.

37. Tanguy, P.A., De la Villion J, Labrie, R., Bousquet, J., Leobouvier, D., Bertrand, F. *Evaluation of macromixing in a mechanical agitated vessel using chaos analysis*. Récents Progrès en Génie des Procèdes. Vol II, No.51 (1997), 259-264.
38. Yianneskis, M.and Popielek, Z. *An experimental study of the steady and unsteady flow characteristics of stirred reactors*. Journal of fluid mechanics. Vol. 175 (1987), 537-555.