

7  
2EJ.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

PROYECTO DE INVESTIGACION SOBRE LA  
TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN TANQUE  
AGITADO CON IMPULSOR DUAL, PARA  
FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A :**

**VICTOR MANUEL AVALOS AVILA**

ASESOR: DR. EDMUNDO BRITO DE LA FUENTE.

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO

1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

270138



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

UNIVERSIDAD NACIONAL  
 AVENIDA DE  
 MEXICO

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
 PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen Garcia Mijares  
 Jefe del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Proyecto de investigación sobre la transferencia de calor  
en un tanque agitado con impulsor dual, para fluidos  
pseudoplásticos.

que presenta el pasante: Víctor Manuel Avalos Avila  
 con número de cuenta: 9021544-5 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.  
 "POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 2 de Octubre de 1999

- PRESIDENTE I.Q. Alvaro Leo Ramírez
- VOCAL Dra. Laura P. Martínez Padilla
- SECRETARIO Dr. Edmundo Brito de la Fuente
- PRIMER SUPLENTE I.A. Rosalía Meléndez Pérez
- SEGUNDO SUPLENTE Dr. José Luis Arjona Roman

## *DEDICATORIA*

Pensando en la debilidad de la mente,  
y no queriendo omitir accidentalmente  
a nadie, dedico a todas y cada una de las  
personas que de alguna u otra forma  
contribuyeron para la realización de  
este trabajo.

## *AGRADECIMIENTOS*

Primeramente a toda mi Familia, Profesores y Amigos. Por su apoyo moral, académico y económico para la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional por la infraestructura técnica y académica sin la cual este trabajo no hubiera sido posible.

A mi asesor de tesis y los sinodales asignados, por su colaboración y consejos para el mejoramiento de este trabajo.

La clave de la  
gran obra se encuentra  
en la forma de mezclar  
los componentes.

*De un códice medieval atribuido al  
alquimista Ibn Sina "Avicena"*

## RESUMEN

---

El Proyecto de investigación que se presenta, forma parte del tema de seminario experimental de la maestría en ciencias de alimentos del posgrado facultad de química, que fue propuesto al comité tutorial de la misma entidad y aceptado.

Del trabajo experimental preliminar realizado se desprenden algunos resultados que acercan a los principios experimentales del sistema de mezclado. Este sistema consta de un tanque agitado mediante un impulsor dual, turbina Rushton - cinta helicoidal.

La finalidad *ulterior*, será como lo indican los objetivos propuestos, el obtener los conocimientos del sistema en estudio en cuanto a la hidrodinámica y las operaciones de transferencia de calor, en forma de gráficos, correlaciones, recomendaciones prácticas, etc.

Es de entenderse que la que la utilidad del proyecto global puede verse implicada en la industria de procesos e incluso para investigaciones posteriores sobre algún tema afín.

Se presenta primeramente un resumen de la revisión bibliográfica llevada a cabo para el planteamiento del proyecto; comenzando por los conceptos generales de las operaciones de mezclado, los aspectos de interés en ingeniería sobre los procesos implicados, como lo son la hidrodinámica y la transferencia de calor, y finalmente generalidades sobre reología, que es uno de los puntos de interés en el estudio.

El planteamiento de objetivos es propuesto así como la hipótesis general, la cual será complementada con hipótesis de trabajo, que surgirán como resultado de las experimentaciones subsecuentes.

Se plantea un desarrollo del proyecto a manera de metodología experimental, proponiendo una serie de actividades y experimentos a realizarse, los Materiales y Métodos a emplearse, así como algunas técnicas descritas en los anexos.

Se muestran los avances logrados hasta el momento sobre el proyecto. A grandes rasgos, estos son el desarrollo de metodologías de trabajo, la obtención de características de los fluidos de trabajo, la obtención de algunos parámetros hidrodinámicos del sistema como el torque residual, la visualización del patrón de flujo y el parámetro  $K_s$  para el agitador en estudio.

Finalmente se obtienen algunas conclusiones fundadas en los trabajos experimentales precedentes y en los resultados de avance.

# ÍNDICE

---

Resumen	i
Índice	iii
Lista de figuras	v
Lista de tablas	vi
Nomenclatura	vii
Introducción	x
1.Revision bibliográfica	1
1.1 Sistemas de mezclado	1
1.1.1. Operaciones de mezclado	1
1.1.2. Equipo para la agitación	2
1.1.2.1. Tipos de agitadores	2
1.1.2.2. Equipo auxiliar	10
1.1.3. Selección del tipo de agitador	14
1.2. Hidrodinámica de los sistemas de agitación	16
1.2.1. Consumo de potencia	17
1.2.1.1. Estrategias experimentales empleadas	22
1.2.2. Patrones de flujo	26
1.2.2.1. Estrategias experimentales en turbinas	27
1.2.2.2. Estrategias para impulsores de proximidad	33
1.2.3. Tiempos de mezclado	35
1.2.4. Operaciones de mezclado en fluidos newtonianos	36
1.3. Transferencia de calor en tanques agitados	39
1.3.1. Estrategias experimentales empleadas	48
1.4. Generalidades de Reología	52

1.4.1. Fluidos newtonianos	53
1.4.2. Fluidos no newtonianos	53
1.4.3. Regímenes de flujo	56
1.5. Discusión sobre la revisión bibliográfica	59
2. Objetivos	61
3. Desarrollo	63
3.1. Cuadro metodológico	63
3.2. Plan general de trabajo	64
3.3. Diseño de experimentos	67
3.4. Materiales	72
3.4.1. Fluidos de trabajo	74
3.5. Métodos	75
3.5.1. Evaluación de las propiedades térmicas	76
3.5.2. Medición de los perfiles de temperatura	77
3.5.3. Medición de torque y velocidad angular	77
3.5.4. Evaluación de los patrones de flujo	79
4. Avances de la investigación	80
5. Conclusiones	93
Bibliografía	95
Anexo 1	100
Anexo 2	102
Anexo 3	103
Anexo 4	106
Anexo 5	107

## LISTA DE FIGURAS

---

1.1. Turbina Rushton.	3
1.2. Turbina de barras.	3
1.3. Agitador revolvedor.	4
1.4. Agitador de barras cruzadas, agitador de rejillas, agitador de paletas.	4
1.5. Agitador de ancla.	5
1.6. Agitadores de propelas.	6
1.7. Agitadores de cinta helicoidal.	7
1.8. Agitador rotor-estator.	8
1.9. Agitador de disco Sawtooth.	9
1.10. Agitador tubular hueco.	9
1.11. Eliminación del vortice por efecto de la colocación de baffles.	10
1.12. Diseño de baffles.	11
1.13. Medios de calentamiento. Tipo serpentín.	12
1.14. Medios de calentamiento. Tipo chaqueta.	13
1.15. Tabla de selección de agitadores.	14
1.16. Agitador amasador horizontal.	15
1.17. Grafica de consumo de potencia.	18
1.18. Estudio del efecto $(p/D)$ , en el valor de $K_p$ para fluidos newtonianos.	21
1.19. Curva de potencia para fluidos no newtonianos	23
1.20. Curva de potencia para fluidos no newtonianos y newtonianos.	25
1.21. Patrón de flujo desarrollado en agua por turbinas y propelas.	28
1.22. Patrón de flujo de turbina Rushton para flujo laminar y flujo turbulento.	29
1.23. Patrón de flujo en un sistema de dos turbinas Rushton.	30
1.24. Patrón de flujo por simulación numérica.	31
1.25. Patrón de flujo por colorimetría.	32
1.26. Patrón de flujo desarrollado por agitador de cinta helicoidal.	33

1.27. Patrón de flujo por simulación 3D.	34
1.28. Gráfica de tiempo de mezclado.	35
1.29. Montaje experimental, técnica de cristal líquido (1).	48
1.30. Montaje experimental, técnica de cristal líquido (2).	49
1.31. Montaje experimental utilizando termopares.	50
1.32. Reograma general de fluidos.	54
3.1. Proporciones geométricas del sistema experimental.	73
3.2. Colocación de los sensores de temperatura.	78
4.1. Impulsor dual, cinta helicoidal-turbina Rushton.	80
4.2. Reograma experimental de fluidos newtonianos.	83
4.3. Reograma experimental de fluidos no newtonianos.	84
4.4. Gráfica de la evaluación del torque residual.	86
4.5. Gráfica de consumo de potencia para Glucosa al 85 %.	88
4.6. Gráfica de consumo de potencia para Glucosa al 90 %.	89
4.7. Gráfica de la relación: Log (Re), Log (Np), para Glucosa al 85 %.	90
4.8. Gráfica de la relación: Log (Re), Log (Np), para Glucosa al 90 %.	91

## LISTA DE TABLAS

1.1. Valores de $K_p$ , para impulsores de cinta helicoidal.	24
1.2. Valores del coeficiente global de transferencia de calor (U), para tanques agitados.	47
4.1. Propiedades físicas de los fluidos de trabajo.	81
4.2. Parámetros reológicos de soluciones de Xantana.	82
4.3. Validación de termopares.	85
4.4. Valores de $K_p$ reportados bibliográficamente.	92

## NOMENCLATURA

---

a	Constante de la ecuación 1.1
b	Constante de la ecuación 1.1
b	Espacio al fondo del tanque (m)
c	Constante de la ecuación 1.1
Cp	Capacidad calorífica(J/kg K)
d	Diámetro del impulsor (m)
D	Diámetro del tanque (m)
E <sub>m</sub>	Energía de mezclado
G	Constante gravitacional 9.81m/s <sup>2</sup>
h	Altura del impulsor (m)
h <sub>i</sub>	Coficiente convectivo de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> °C)
h <sub>o</sub>	Coficiente convectivo de transferencia de calor del fluido de calentamiento (W/m <sup>2</sup> °C)
k	Conductividad térmica (Wm <sup>2</sup> C)
Kp	Constante Np Re
H	Altura del fluido
K	Índice de consistencia (Pa s <sup>n</sup> )
Ks	Constante de Metzner y Otto
n	Índice de comportamiento
N	Velocidad rotacional (R.P.S.)
N <sub>tm</sub>	Número de Mezclado
P	Potencia (W)
Q <sub>1</sub>	Calor cedido por el medio de calentamiento (J)
Q <sub>2</sub>	Calor absorbido por la solución (J)
Q <sub>3</sub>	calor total del sistema
t <sub>c</sub>	Tiempo de circulación (s)
t <sub>m</sub>	Tiempo de mezclado (s)
t	Tiempo (s)

T	Temperatura (°C)
T	Torque (Nm)
T <sub>o</sub>	Torque residual (Nm)
T <sub>o</sub>	Temperatura de entrada a la chaqueta (°C)
T <sub>s</sub>	Temperatura de salida de la chaqueta (°C)
T <sub>w</sub>	Temperatura en la pared interior del tanque (°C)
T <sub>i</sub>	Temperatura promedio en el interior del tanque (°C)
U	Coficiente global de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> °C)
V	Volúmen del tanque (m <sup>3</sup> )

## LETRAS GRIEGAS

α	Constante de la ecuación 1.19
β	Constante de la ecuación 1.19
δ	Constante de la ecuación 1.19
γ	Constante de la ecuación 1.19
τ	Esfuerzo de corte (pa)
η	Viscosidad aparente (Pa s)
μ	Viscosidad newtoniana
γ	Velocidad de corte (s <sup>-1</sup> )
β	Coficiente de expansión térmica
Δ	Diferencial de...
η <sub>e</sub>	Viscosidad de proceso
μ <sub>avg</sub>	Viscosidad aparente promedio
π	Pi=3.1416
φ	Suma de resistencias
ρ	densidad (Kg/m <sup>3</sup> )

## NUMEROS ADIMENSIONALES

Fr	Número de Froude
Gr	Número de Grashof
Gr <sub>m</sub>	Número de Grashof para mezclado
Np	Número de Potencia
Nu	Número de Nusselt
Pr	Numero de Prandtl
Re	Número de Reynolds
Re <sub>i</sub>	Número de Reynolds en agitación
Re <sub>gen</sub>	Número de Reynolds generalizado
Ri	Número de Richardson
Vi	Relación de viscosidades

## INTRODUCCION

---

El mezclado, la agitación y el amasado, son actividades que el hombre ha llevado a cabo desde tiempos inmemoriales para la preparación de sus alimentos y bebidas y pertenecen a las operaciones unitarias clásicas utilizadas en muchas ramas industriales como la producción de materiales de construcción, los procesos de desarrollo de vidrio, productos químicos y productos alimenticios.

En la industria alimentaria y química, esta tecnología tiene una importancia especial, por un lado para que se lleven a cabo las reacciones químicas, es necesario que los reactivos estén en contacto directo, para lo cual es necesario que en el reactor se lleve a cabo un mezclado que propicie la interacción de las entidades reactantes; en casos extremos la reacción no se lleva a cabo sin la existencia de este tipo de movimientos por ejemplo en algunas reacciones de copolimerización, (Brito et al 1997).

En el caso de la industria alimentaria, gran parte de los productos y sus intermediarios se obtienen tras la mezcla de muy diversos componentes en cualquier estado de agregación, en otros casos por ejemplo de productos biotecnológicos, es de suma importancia tener control estricto sobre la homogeneidad de los medios en los reactores, para estos casos en particular se necesita, además, controlar las concentraciones de algunas fuentes de nutrientes como oxígeno o bióxido de carbono; otros casos son las dispersiones, la preparación de soluciones, etc.

Tanto en las industrias de alimentos como químicas, los procesos de mezclado suelen ir acoplados a un calentamiento o enfriamiento del sistema que se está mezclando, debido a que muchos de esos procesos a que nos referimos, se llevan a cabo a altas temperaturas, o bien expelen mucho calor, por lo cual se hace necesario calentar o enfriar, respectivamente.

Los estudios en el ámbito científico de sistemas de mezclado han sido llevados a cabo desde mediados de este siglo. La mayoría de estos estudios se han abocado a los aspectos hidrodinámicos de sistemas con agitadores clásicos, y en algunos estudios se ha abordado la transferencia de calor del sistema. La importancia de este tipo de estudios es clara, pues en ello se ven implicados los procesos industriales que se basan en tales principios y que desde luego emplean los resultados de las investigaciones científicas para poder controlar, optimizar o mejorar a las operaciones implicadas.

Dentro de las investigaciones de la hidrodinámica de los sistemas de mezclado llevadas cabo, se han encontrado propiedades de importancia, como lo son relaciones geométricas recomendables en el sistema, proposiciones para la elección de agitadores para procesos específicos, desarrollo de ecuaciones para el cálculo de parámetros de utilidad como el consumo de potencia, además claro de que algunos estudios son la pauta para trabajos posteriores mas específicos.

Dentro de las investigaciones de la transferencia de calor, se han encontrado leyes que describen la forma en que se transmite el calor a través de materiales sólidos e incluso de fluidos; relaciones empíricas que predicen tiempos de proceso en función a características de materiales, etc. Sin embargo los estudios de este tipo de fenómenos por lo general se han llevado a cabo para casos de impulsores particulares o para operaciones simples; teniendo por lo tanto una falta de información para las operaciones unitarias o procesos en los cuales los fenómenos de transferencia de calor se dan en sistemas de mezclado. Esto implica que una evaluación de condiciones de operación por lo general se realice utilizando aproximaciones teóricas o modelos empíricos de la operación; en general esto causa desviaciones entre los resultados esperados, (Charm, 1978).

Adicionalmente, las investigaciones que se han llevado a cabo hacen consideraciones que no necesariamente se cumplen en la práctica, (Brito, et al 1997); por lo general se desprecia el tiempo en que el sistema alcanza el estado estable, el efecto de la convección natural y la influencia de los parámetros reológicos; aunado a que como ya se mencionó, los estudios mayoritariamente se han centrado en geometrías clásicas, que se aplican bien para fluidos de baja viscosidad, y se ha dejado a un lado los impulsores de proximidad que por otra parte se ha visto que tienen mejor rendimiento para fluidos de alta viscosidad o de reología compleja.

Muchos de los tipos de impulsores existentes, aun no se han estudiado completamente, por lo cual las correlaciones correspondientes para calcular parámetros hidrodinámicos o térmicos, se desconocen total o parcialmente.

Complementariamente, las tendencias de las investigaciones sobre el mezclado se han orientado a desarrollar agitadores "múltiples", en los cuales se pretende obtener una o varias de las características que el mezclado realiza, optimizar un proceso, etc. Se ha visto que los estudios previos de los agitadores individuales que les conforman, no son aplicables para el caso múltiple, Esto ha impulsado a desarrollar estudios que impliquen todas las áreas de interés sobre este tipo de impulsores y con ello obtener una caracterización completa del mismo.

# 1. REVISION BIBLIOGRAFICA

---

## 1.1. SISTEMAS DE MEZCLADO

### 1.1.1. OPERACIONES DE MEZCLADO

En la gran mayoría de procesos tanto de la industria de alimentos como química, se realiza en mayor o menor grado la operación de mezclado. Tenemos el caso de las reacciones biotecnológicas, las reacciones de polimerización, la producción de sabores, la industria de procesos cárnicos, etc.

En el diseño de las plantas y procesos industriales, la selección de los sistemas de agitación, así como de los equipos empleados en las otras operaciones, puede representar un papel importante en la optimización de los costos del proceso, (Charm, 1978).

El conocimiento de los objetivos del proceso, es esencial para determinar los parámetros significativos en la elección o diseño de los equipos del mezclado. Un equipo con un consumo de potencia bajo no necesariamente reditúa en un proceso mas optimo, pues ello puede emplear un tiempo de operación muy grande.

Cuando los componentes líquidos son predominantes en las mezclas, la operación de mezclado se denomina agitación. Se pueden considerar como operaciones de agitación a las siguientes:

1. Homogenización, por ejemplo en la igualación de diferencias en concentración y temperatura
2. Intensificación de la transferencia de calor entre el líquido y la superficie de transferencia.
3. Suspensión (y su posible disolución) de un sólido en un líquido .
4. Dispersión de un gas en un líquido. (Charm, 1978).

## 1.1.2. EQUIPO PARA LA AGITACIÓN

En los procesos de mezclado, los líquidos se procesan en tanques cilíndricos ya sea abiertos o cerrados. Los tanques pueden contar con equipos adicionales, como son sistemas para control de condiciones, sistemas de medio de calentamiento, baffles, etc. (Mc Donough, 1992)

En las investigaciones llevadas a cabo sobre los equipos de mezclado se han encontrado ciertas características deseables, por ejemplo se recomienda que la altura del líquido en el tanque sea aproximadamente igual al diámetro de éste. Para el sistema, un motor eléctrico impulsa al agitador, el cual va montado sobre un eje; por otro lado, dicho motor puede estar conectado a un dispositivo que permita variar la velocidad de giro, a expensas de diferentes consumos de potencia, (Harnby, 1992).

### 1.1.2.1. TIPOS DE AGITADORES

Algunas de las características que se busca obtener con el mezclado – homogenización, promoción de la transferencia de calor, dispersión de gas, etc.- no necesariamente pueden ser desarrolladas en su totalidad con un tipo de agitador simple, por lo cual se han desarrollado tipos complejos de agitadores e incluso tipos en los cuales se adaptan dos o más agitadores ya sea del mismo tipo o diferentes. Comúnmente existe un agitador más recomendable para una operación de mezclado específica o un material, (Charm, 1978). Los siguientes tipos de agitadores, que a continuación se muestran son los más usados en la industria

#### 1. Agitador de turbina (Turbina Rushton, o de seis placas sobre un disco).

Es el único impulsor de alta velocidad que promueve el movimiento radial, o a alta viscosidad el movimiento tangencial. Sin embargo, solo es efectivo con líquidos de baja viscosidad y tanques con baffles. En este caso la relación de diámetros  $D/d$  es de 3 a 5. Durante la rotación, la agitación de la turbina causa altos niveles de cizalla y es por ello apropiado para operaciones de dispersión. Ver figuras 1.1, 1.2.

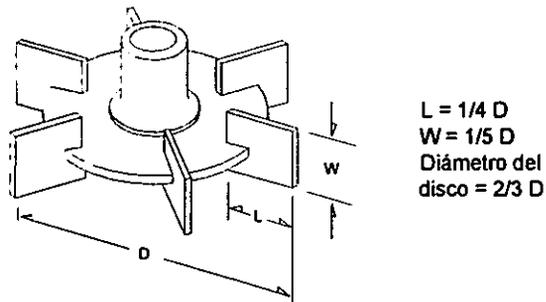


Figura: 1.1. Turbina Rushton.

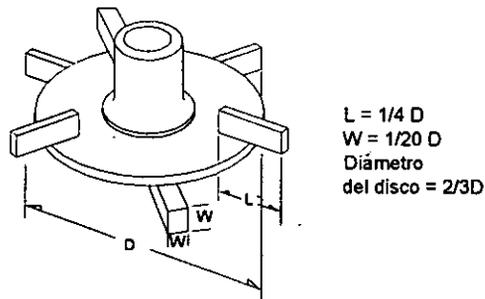


Figura1.2. Turbina de Barras.

## 2. Agitador de tipo revolvedor.

Fue desarrollado para usarse en tanques revestidos de esmalte, por ello tiene los brazos redondeados. Se usa junto con pequeños espacios al fondo del tanque y con una relación  $D/d = 1.5$  o entre los baffles. Ver figura 1.3.

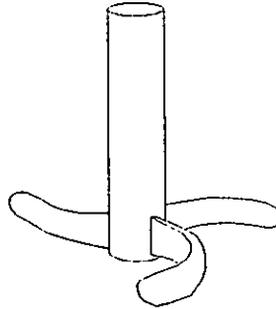


Figura 1.3. Agitador revolvedor.

### 3. Agitadores de barras cruzadas, rejilla y paleta.

Pertencen al grupo de agitadores de baja velocidad y se usan con una relación  $D/d = 1.2 - 2$ . Pueden operar con baffles o sin ellos; para fluidos viscosos, son especialmente empleados para homogenizar. Ver figura 1.4.

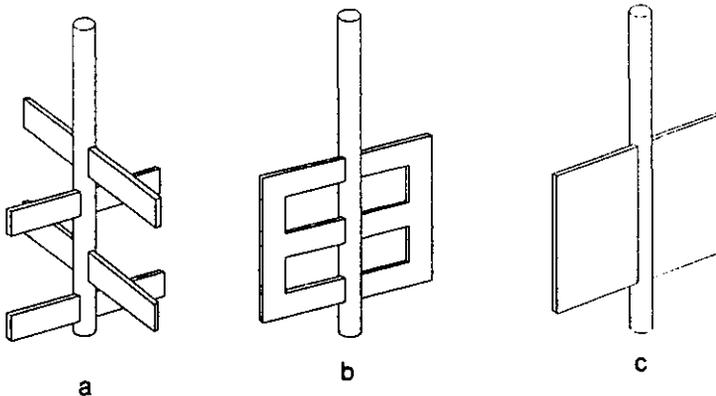


Figura 1.4. a) agitador de barras cruzadas; b) agitador de rejilla  
c) agitador de paleta.

#### 4. Agitador de ancla.

Se emplea de manera general, con un espacio anular a la pared muy pequeño ( $D/d=1.05$ ), y es muy apropiado para operaciones en las que se lleva a cabo transferencia de calor de fluidos muy viscosos. Ver figura 1.5.

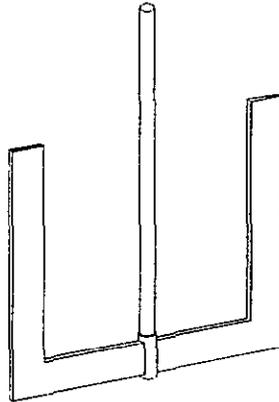


Figura 1.5. Agitador de ancla.

#### 5. Agitador de paleta con hojas extremas.

En particular el agitador de propelas, pertenece al grupo de mezcladores de alta velocidad, que generan patrón de flujo axial. Como regla se utilizan para fluidos de baja viscosidad y en tanque con baffles. Se usan comúnmente para homogenización y dispersión de sólidos. Para realzar la componente de flujo axial en medios mas viscosos y para relaciones  $H/D > 1$  (por ejemplo fermentadores), se utilizan impulsores acoplados como el tipo de barras cruzadas. Estos agitadores se operan a baja velocidad con  $D/d \cong 1.5$  (con baffles) o  $D/d \cong 1.1$  (sin baffles). Las operaciones de mezclado para este tipo de impulsores incluyen la homogenización (Figuras 1.6.(a), (1.6(c))), suspensión de sólidos (Figuras 1.6(a), 1.6(b), 1.6(c)) y la dispersión (Figura 1.6(d)).

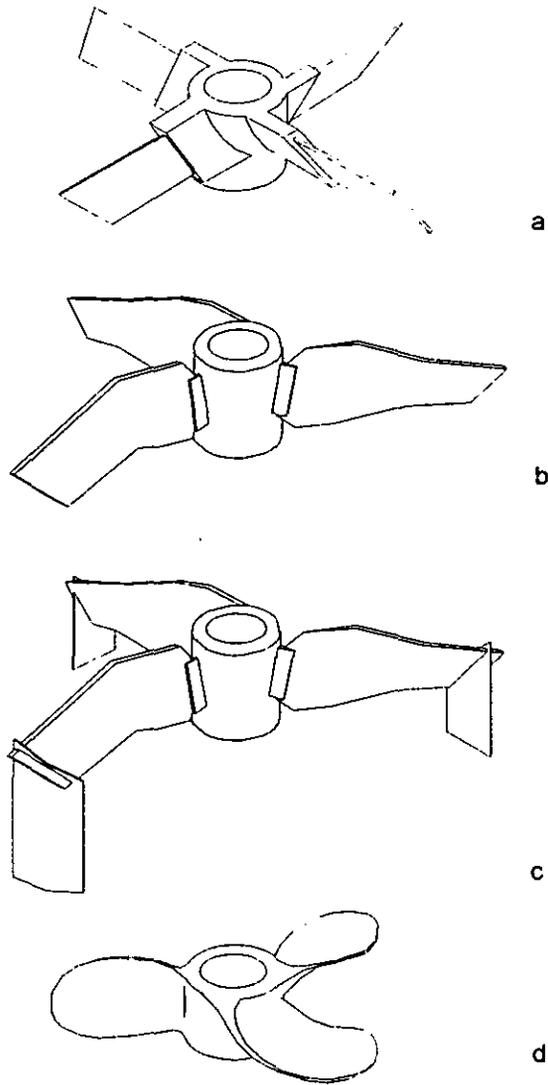
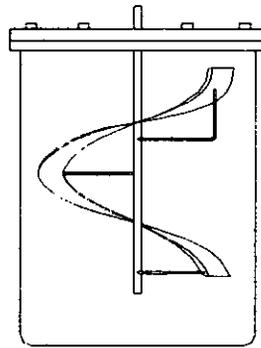


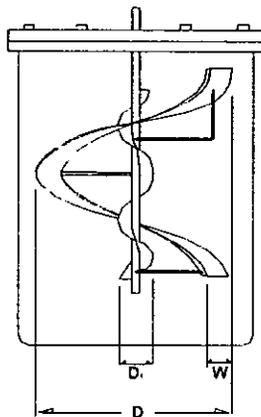
Figura 1.6. Agitadores de Propelas. a, b, c, angulares,  
d) marina

## 6. Agitadores de cinta helicoidal.

Se emplean a muy baja velocidad, y pequeño espacio anular ( $D/d = 1.05$ ) y se operan de tal forma que el líquido se bombea por la pared del tanque en forma descendente. Con estas condiciones este tipo de impulsor es el de mejores características para homogenizar líquidos de alta viscosidad.



a



b

Figura 1.7. Agitadores de cinta helicoidal:

a) Cinta helicoidal simple, b) Cinta helicoidal y tornillo

Adicionalmente a este tipo de agitadores, existe un gran número de diseños especiales, como son los siguientes tipos.

#### 7. Agitador Rotor Estator..

El rotor consiste en una hoja o paleta adaptada por un anillo de baffles (estator). Como resultado de los altos niveles de cizalla se imparten velocidades altas a pequeños volúmenes del fluido. Ver figura 1.8.

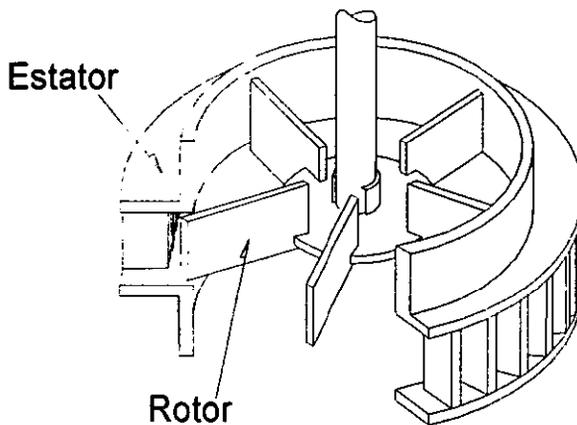


Figura 1.8. Agitador Rotor, Estator

#### 8. Agitador de Disco Sawtooth.

Consistente en un disco plano dentado, el líquido es acelerado a altas velocidades en dirección radial, en un anillo delgado a partir del centro. Se pueden alcanzar altos niveles de corte sin anillo estator o baffles. Igualmente estos tipos de agitadores son usados particularmente para emulsificación y dispersión en un amplio intervalo de viscosidades. Ver figura 1.9.

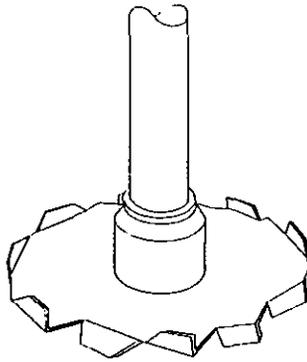


Figura 1.9. Agitador de disco Sawtooth.

### 9. Agitadores huecos.

En este tipo la cabeza del agitador esta hueca y se conecta a través de la flecha hueca a una conexión de gas. La succión generada detrás de las orillas del agitador durante la rotación, puede ser usada para suministrar gas al líquido. Por este motivo este tipo de agitador se utiliza en operaciones en las que se lleva acabo transferencia de masa en sistemas gas-líquido. Todos los agitadores huecos operan a altas velocidades y usando baffles en tanques con relaciones  $D/d= 3-5$ . Ver figura 1.10.

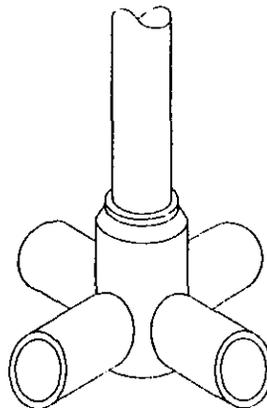


Figura 1.10 Agitador tubular hueco.

### 1.1.2.2. EQUIPO AUXILIAR

Las operaciones de mezclado se llevan a cabo principalmente en tanques agitados conocidos como sistemas clásicos, pero también pueden ser empleados otros elementos tales como los tanques de almacenamiento, tuberías, etc. El diseño de los tanques de mezclado, está definido por estándares internacionales como el código ASME o el estándar DIN. Algunas de las partes interiores del equipo consisten en baffles serpentines tubulares e instrumentos (por ejemplo termómetros, niveles de indicación, etc.). Estas partes interiores tienen alguna influencia en el proceso.

Si un agitador es operado en posición axial, en un tanque sin baffles, es común que el líquido forme un vórtice en el tanque como se muestra en la figura 1.11 (a). La implicación de la formación del vórtice en el tanque, es que permite la entrada de aire en el líquido. Esto es indeseable sobre todo en aquellas operaciones en las que los productos a obtenerse deben permanecer sin oclusiones de aire.

Este tipo de rotación del líquido en un tanque cilíndrico, se evita instalando baffles, ver figura 1.11 (b). Una adecuación altamente efectiva, se logra colocando cuatro baffles con una relación de  $D/10$  (en donde  $D$  es el diámetro interno del tanque), dichos baffles se colocan en posición vertical a la pared del tanque.

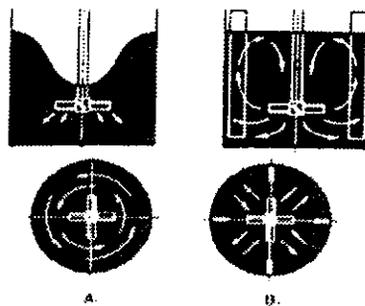


Figura 1.11. Eliminación del vórtice  
Por efecto de la colocación de baffles.

(McDonough, 1992).

Para evitar el volumen muerto detrás de los baffles, el ancho del baffle se reduce a  $D/10$  o  $D/12$ , con una separación de la pared de  $D/50$ , como puede verse en la figura 1.12.

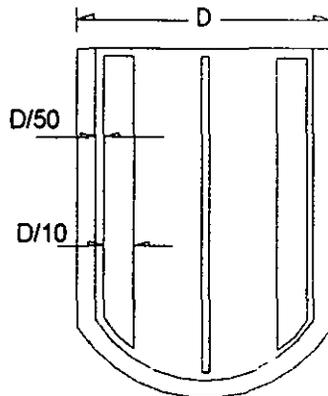
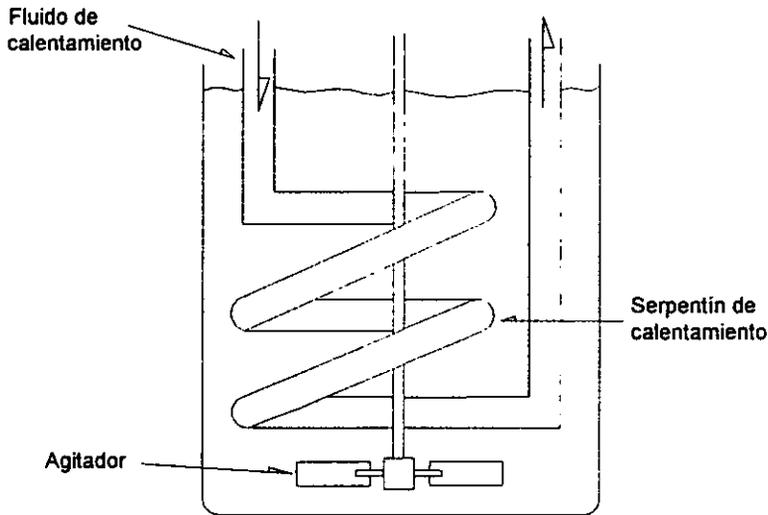


Figura 1.12. Diseño de baffles.

Los baffles no son necesarios cuando el agitador está sostenido fuera del tanque de agitación, o cuando está introducido lateralmente. Cuando el agitador es débil, la rotación debida al líquido puede prevenirse, instalando el agitador en el centro o en ángulo con respecto al eje. En este caso, sin embargo, la desigual tensión mecánica en la flecha del agitador, puede ser aceptada, (Harnby, 1978).

Para suministrar o remover grandes cantidades de calor, los tanques agitados se equipan con serpentines. Ver figura 1.13.

Un Serpentin es solamente efectivo, cuando se genera un patrón de flujo axial, ya que se produce una buena circulación entre el serpentin y la pared. En contraste, la circulación del líquido producida por agitadores radiales es deflectada fuertemente por el serpentin, así que el flujo anular entre el serpentin y la pared es insuficiente para un mezclado eficiente. Para este tipo de agitadores se recomienda el diseño vertical, ya que no se propicia de esta manera la deflección del flujo radial. Ver figura 1.13.



*Figura 1.13. Medios de calentamiento de tanques.  
Tipo serpentín.*

Otro tipo de diseños se han desarrollado para operaciones en las cuales no es posible mantener un serpentín dentro del tanque de agitación, ya sea por efectos mecánicos, como el efecto de una viscosidad alta o los problemas debidos a las incrustaciones, o por la necesidad de mantener un medio inocuo, como en el caso de las reacciones biotecnológicas y en ciertos casos las de producción de alimentos; en estos diseños al tanque se le coloca una doble carcasa, conocida como chaqueta, la cual puede ser abierta, o en otros caso un serpentín en el cual circula el líquido de intercambio de calor, (Geankoplis, 1993). Ver figura 1.13.

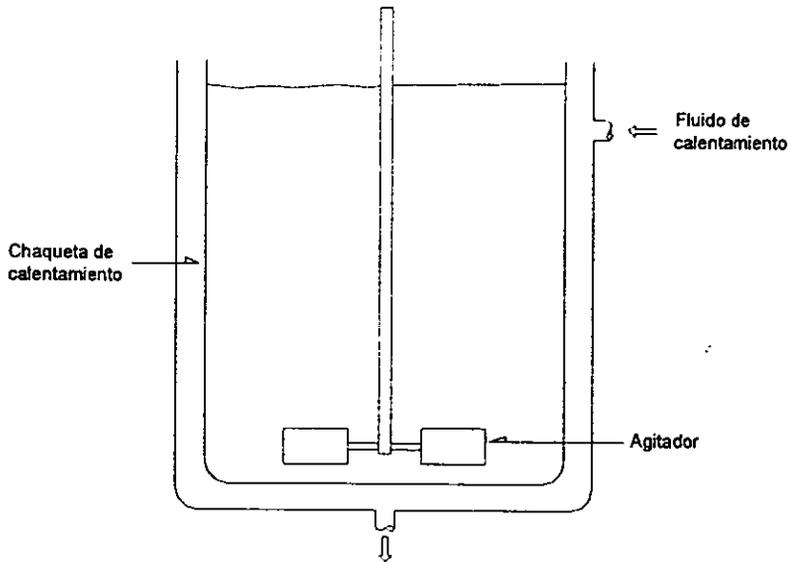


Figura 1.14. Medios de calentamiento de tanques.  
Tipo chaqueta.

### 1.1.3. SELECCIÓN DEL TIPO DE AGITADOR

Existe una gran cantidad de criterios reportados en la literatura para llevar a cabo la selección del tipo de impulsor a usar en un cierto proceso. Una de las formas más comúnmente usadas es reportada por Ho, et al. (1973), que se basa en el uso de una carta referencial, la cual se muestra en la figura 1.15; en ésta se toma como parámetro principal la viscosidad del líquido y el tamaño del tanque.

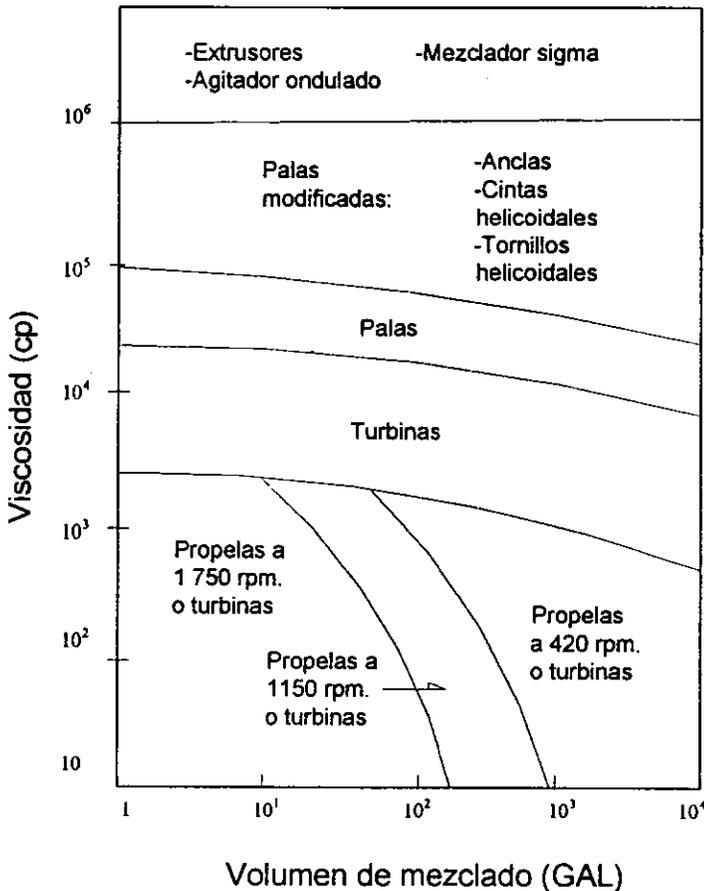


Figura 1.15. Grafica de selección de agitadores.

(Ho et al 1973).

Sin embargo este tipo de cartas son solo aproximaciones En la práctica los intervalos de uso son mas extensos, teniendo en cuenta de que además no siempre se tienen los límites que en dicha carta se expresan.

Sin embargo, en concordancia con dicha carta se puede decir por lo general, que los usos recomendados son los siguientes:

1. Propelas, cuando la viscosidad es menor de 3000 cp.
2. Turbinas, cuando la viscosidad se encuentra entre 3000 y 50 000 cp.
3. Paletas, cuando la viscosidad se encuentra entre 50 000 y 90 000 cp.
4. Paletas modificadas (andas y hélices), cuando la viscosidad se encuentra entre 90000 y 1000 000 cp. (Charm, 1978).

Cuando la viscosidad del líquido es mayor a 1 millón de cp. Se tiene una consistencia semejante a una pasta dura, para estos casos se emplea un amasador horizontal de canal, así como un agitador en Z o un mezclador sigma. Ver figura 1.16. Este tipo de agitadores son empleados para fluidos mas viscosos porque la relación entre el diámetro del rotor y el tubo es muy pequeña por lo que se obtiene una mayor eficiencia de la potencia aplicada a lo largo de la longitud del agitador.

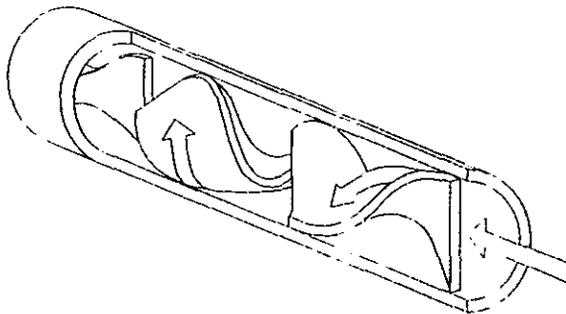


Figura 1.16. Agitador-amasador horizontal.

## 1.2. HIDRODINAMICA DE LOS SISTEMAS DE AGITACIÓN

La caracterización hidrodinámica de tanques, ya sea en el ámbito de laboratorio o en el ámbito industrial, implica el conocimiento y/o la determinación de ciertos parámetros propios de cada sistema de agitación en particular, los parámetros de mayor importancia son el consumo de potencia, el tiempo de mezclado y de circulación, los patrones de flujo y la energía de mezclado (Nuñez, 1996).

Según Edwards (1985), el *consumo de potencia*, representa la velocidad de disipación de energía dentro del líquido. La representación de este parámetro en forma adimensional es la siguiente:

$$N_p = K_p Re^a Fr^b \text{ (variables geométricas)}^c \quad (1.1)$$

El tiempo necesario para lograr un grado específico de homogeneidad es lo que se define como el *tiempo de mezclado* según Brito et al (1990), o como el tiempo requerido por un trazador para dispersarse según Edwards (1985). Un parámetro que relaciona el tiempo de mezclado con la velocidad de agitación, es el conocido como número de mezclado ( $Nt_m$ ), que es constante para el régimen laminar de mezclado, y que se ha propuesto para conocer el número de veces que es necesario girar el impulsor para alcanzar un estado de homogeneidad o la dispersión total de un trazador.

Cuando se evalúa el patrón de flujo, es necesario definir el tiempo de circulación ( $t_c$ ), el cual es el tiempo necesario para que un trazador recorra un ciclo del patrón de flujo que se da en esas condiciones en el tanque; Brito et al (1990), encontraron que también es una constante en el régimen laminar.

Cuando es necesario hacer una comparación entre diversos tipos de impulsores, muchas veces se recurre al parámetro de consumo de potencia, sin embargo no siempre el conocimiento de éste implica determinar de la mejor manera el impulsor más adecuado, ya que a expensas de un bajo consumo de potencia, algunos impulsores emplean mucho tiempo de mezclado, lo cual

descompensa el otro factor; por este motivo se ha definido el concepto de *energía de mezclado*, el cual es la cantidad de energía suministrada al sistema para alcanzar un nivel específico de homogeneidad, se evalúa como:

$$E_m = P \cdot t_m \quad (1.2)$$

Aunque los estudios llevados a cabo sobre la hidrodinámica de sistemas de agitación son muy amplios, por lo general se ha dado un mayor énfasis al consumo de potencia y los patrones de flujo. Los otros parámetros dependen en mayor grado de diversas condiciones de operación.

### 1.2.1. CONSUMO DE POTENCIA

La aplicación del análisis dimensional a las variables que intervienen en la operación de mezclado, ha dado como resultado que el número de potencia ( $N_p$ ) es una función del número de Reynolds ( $Re$ ), el número de Froude ( $Fr$ ) y de diversas relaciones geométricas, como ya se definió en la ecuación (1.1). Se ha visto que para  $Re < 300$ , el número de Froude puede despreciarse ( $Fr=1$ ), (Nuñez, 1996).

La experimentación llevada a cabo en tanques agitados implica el determinar el consumo de potencia vía el cálculo del número de potencia y/o viceversa, además de otros parámetros como el  $Re$ , etc. Las relaciones matemáticas que los investigadores han propuesto (Metzner, 1955; Ho et al, 1973; Harnby, 1992) ven implicados parámetros propios del sistema de agitación tales como el valor de  $K_p$ ; dichas ecuaciones muestran que este valor es función principalmente de las relaciones geométricas del sistema, tales como  $p/D$ ,  $w/d$  y  $d/D$ .

Cuando se tiene un régimen de flujo laminar dentro del tanque, la curva de potencia obtenida, es característica, como puede verse en la Figura 1.17.

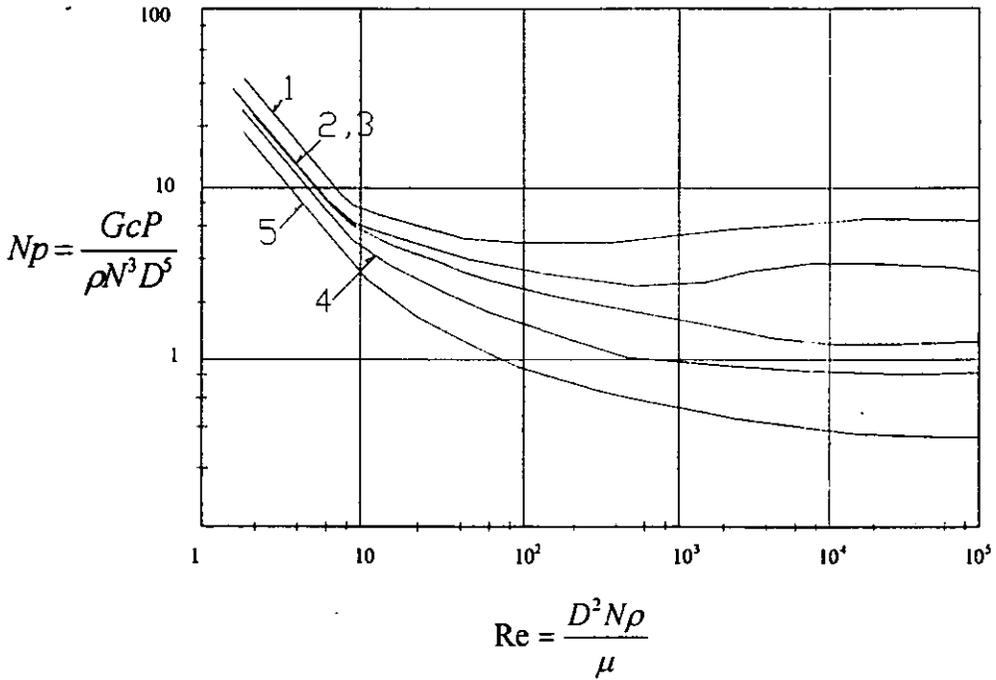


Figura 1.17. Curva de potencia para: 1) turbina de aspas planas,  
 2) Turbina de aspas abiertas, 3) Turbina de aspas en ángulo,  
 4) Propela, 5) Propela con baffes.

(Geankoplis, 1993).

Como puede observarse, el producto del número de Reynolds y el número de potencia es una constante, conocida como  $K_p$ , dicha constante indica comparativamente si un impulsor gasta más energía que otro bajo las mismas condiciones, por lo cual es característico de un sistema de agitación en particular.

En el caso de los fluidos no newtonianos para impulsores helicoidales se ha demostrado que el valor de  $K_p$  también es dependiente de las propiedades reológicas de los materiales, y en particular del índice del modelo de la ley de la potencia, tal como se ha demostrado por Brito (1992) y Carreau et al (1993).

Cuando se establece la caracterización hidrodinámica de un sistema de agitación, y solo se establece el consumo de potencia, es común que se determine el valor de  $K_p$ . En muchos casos se intenta solamente establecer una relación matemática que permita predecirlo sin recurrir a la experimentación, lo cual es aun más común en industrias y para los diseñadores de equipo.

Algunas de las estrategias que se han seguido para proponer dichas correlaciones matemáticas, para la evaluación del  $K_p$ , son el análisis dimensional, las analogías de flujo y el análisis computacional, como lo menciona Nuñez (1996).

Nagata et al. (1972), llevaron al cabo estudios sobre el consumo de potencia con impulsores helicoidales, empleando fluidos newtonianos. La determinación de las curvas de potencia los llevo a determinar la siguiente correlación:

$$Np = 52.5 \left( \frac{D-d}{d} \right)^{-0.5} \left( \eta_b \frac{d}{\rho} \right)^{0.5} Re^{-1} \quad (1.3)$$

Otro estudio realizado para el caso de cintas helicoidales fue el llevado a cabo por Ho y Kwong (1973), determinaron ciertas correlaciones para el caso de régimen laminar ( $Re < 20$ ):

$$Np = 290 Re^{-1}, \quad \text{para } p/D = 0.5$$

$$Np = 186 Re^{-1}, \quad \text{para } p/D = 1$$

Un trabajo realizado en 1976 por Sawinsky et al. quienes trabajaron con fluidos no newtonianos, propone que la potencia para impulsores helicoidales, es función además de factores geométricos:

$$P = A_m d^3 N^{1-n} K \quad (1.4)$$

En donde los factores geométricos  $A_m$ , se calculan como:

$$A_m = 19 \exp \left[ (n-1) \left( \frac{4.2d}{D} - 0.5 \right) \right] \quad (1.5)$$

Masiuk et al (1992), llevaron a cabo un estudio sobre tiempos de mezclado y consumo de potencia; observaron que algunas otras correlaciones geométricas se veían involucradas en el cálculo del consumo de potencia, la correlación que propusieron es la siguiente:

$$Np = 473 \text{Re}^{-1} \left( \frac{w}{d} \right)^{0.38} \left( \frac{p}{d} \right)^{-0.2} \quad (1.6)$$

la cual es válida para los intervalos  $0.5 < p/d < 2$ ;  $0.044 < w/d < 0.33$ ;  $38 < \text{Re} < 270$ .

Finalmente, Brito et al. (1992) propusieron una correlación para fluidos newtonianos de la forma:

$$Np = 173.1 \text{Re}^{-1} \left( \frac{p}{d} \right)^{-0.72} \left( \frac{w}{d} \right)^{0.14} \quad (1.7)$$

Nuñez (1996); haciendo un análisis de los resultados obtenidos por diferentes investigadores, realizó una gráfica comparativa de los resultados que se obtienen para condiciones semejantes. Ver figura 1.18.

De dicho análisis se observa que el valor de  $K_p$  disminuye conforme aumenta la relación  $p/d$ . Además, se observa que la importancia de tomar en cuenta demasiados parámetros implica que la incertidumbre sobre el resultado obtenido sea alta.

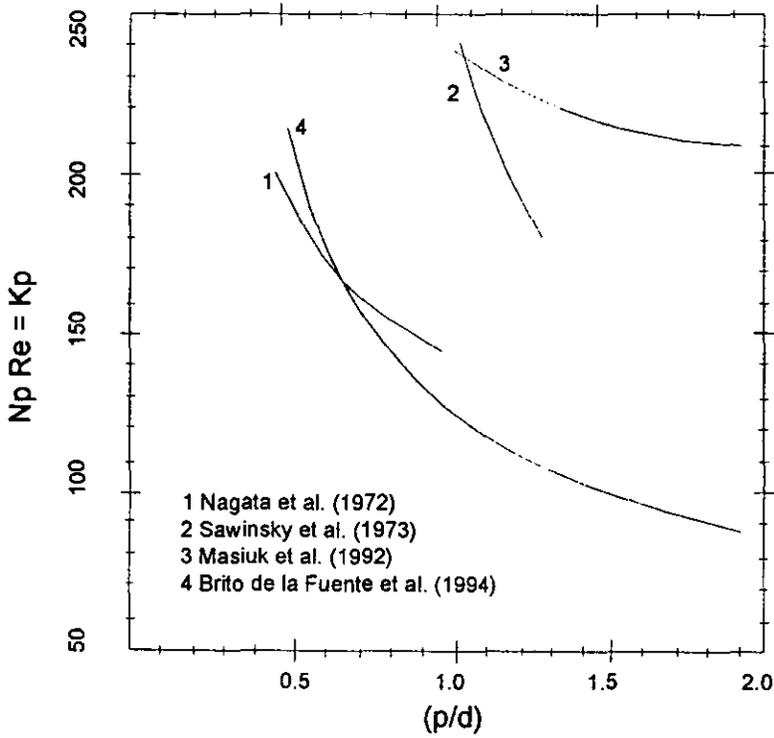


Figura 1.18. Estudios del efecto de  $(p/D)$  en el valor de  $Kp$ , para fluidos newtonianos (Nuñez, 1996).

### 1.2.1.1 ESTRATEGIAS EXPERIMENTALES EMPLEADAS

Metzner y Otto (1957), realizaron los primeros experimentos sobre el consumo de potencia en tanques agitados; emplearon para su estudio, impulsores del tipo turbinas para los regímenes laminar y de transición, la conclusión a la que llegaron es que se requiere mayor potencia para agitar un fluido no newtoniano que un newtoniano bajo las mismas condiciones de agitación.

En este estudio la agitación se llevo acabo en un tanque, haciendo variaciones en las relaciones geométricas del diametro del impulsor y del tanque, con lo cual se pudieron obtener las correlaciones de números adimensionales adecuadas para la finalidad del estudio.

El tanque empleado era de tipo cilíndrico de tapas planas, el agitador fue impulsado por un motor en forma vertical. La medición del torque se llevó acabo mediante un dinamómetro acoplado al eje del motor y la velocidad del mismo mediante un tacómetro electrónico. La medición de los parámetros reológicos fue llevada acabo en un viscosímetro capilar.

De los resultados obtenidos, se construyó una curva de potencia en la cual se muestra que bajo ciertas condiciones de agitación constantes, dicha curva es semejante para diversos líquido ( Figura 1.19)

Brito et al. (1997), realizaron un estudio sobre la influencia del comportamiento reológico (particularmente de fluidos no newtonianos), con respecto al consumo de potencia; los fluidos utilizados fueron del tipo Newtoniano, Viscoelástico, y Pseudoplástico. El sistema de agitación consistió de un tanque agitado, el tipo de impulsor fue de cinta helicoidal, tornillo.

De los resultados obtenidos se observó que el consumo de potencia decrece conforme el comportamiento pseudoplástico aumenta, además se desarrollo un modelo para predecir las desviaciones del consumo de potencia newtoniana a la análoga pseudoplástica.

Se observo también que el consumo de potencia aumenta conforme el grado de inclinación de la hoja del impulsor decrece o cuando el ancho de la hoja aumenta.

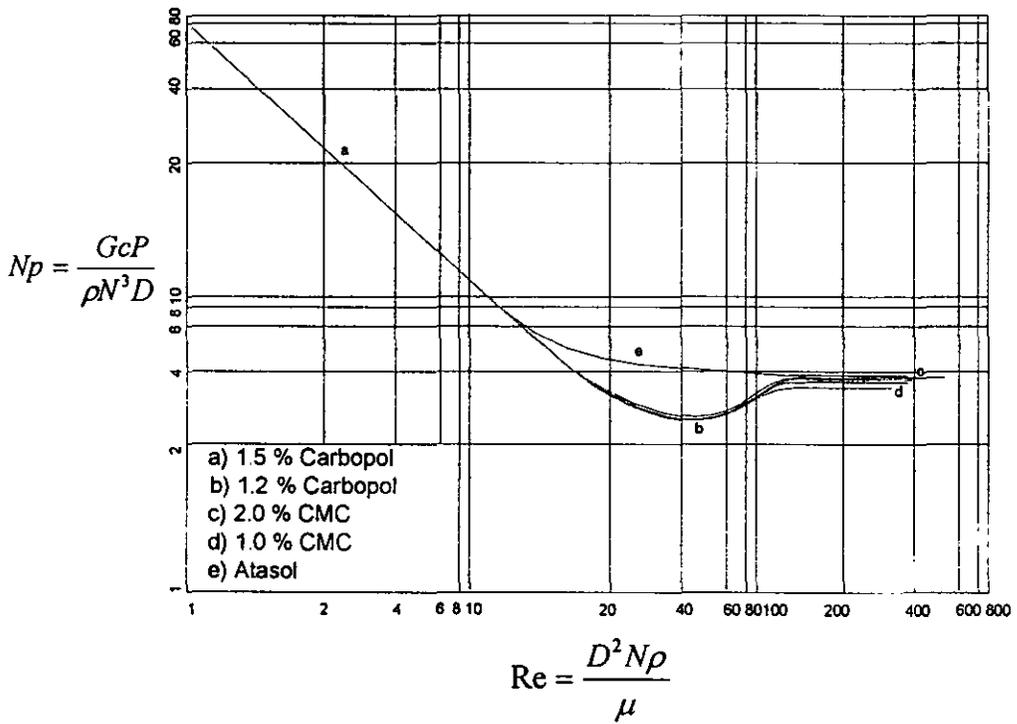


Figura 1.19. Curva de potencia para fluidos no newtonianos  
(Metzner y Otto, 1957).

Como en otros trabajos, se mostró que existe una similitud entre los datos representados en la curva de potencia para fluidos no newtonianos, contrariamente con la curva obtenida para los fluidos newtonianos, (Kuriyama et al, 1979; Shamlou et al, 1985; Carreau et al, 1993). (Figura 1.20).

Adicionalmente se obtuvo de los experimentos realizados una tabla de los valores del  $K_p$ , para diferentes tipos de impulsores de cinta helicoidal empleados, ver tabla 1.1.

*Tabla 1.1 Valores de  $K_p$ , para diversos tipos de impulsores de cinta helicoidal.  
(Brito et al, 1997)*

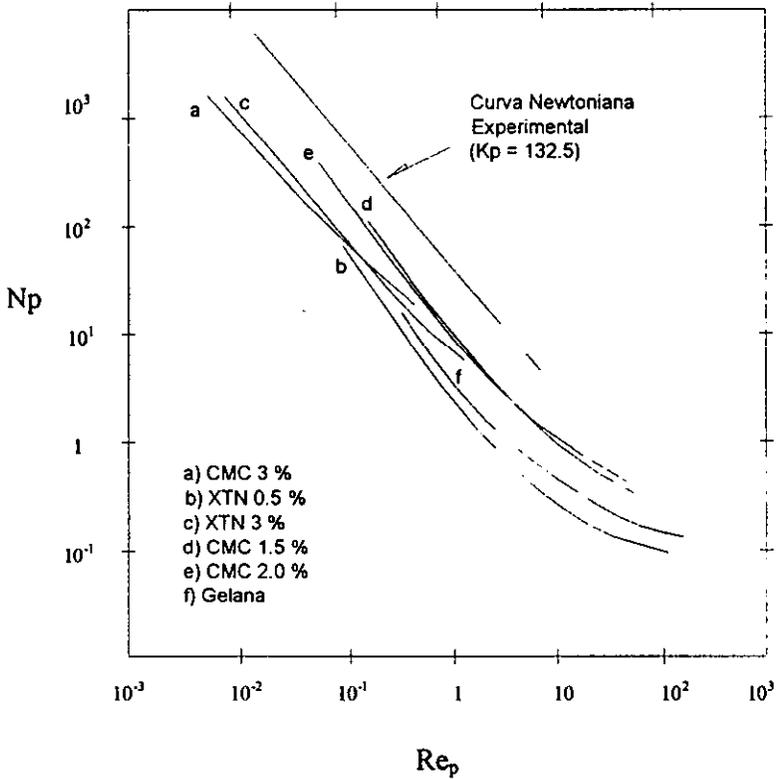
Np Re = $K_p$					
Tipo de impulsor	Brto et al, (1997)	Hall y Godfrey (1970)	Chavan y Ulbretch (1973)	Yap et al. (1979)	Shamlou y Edwards (1985)
HRS	127.6	109.2	125.0	92.4	162.5
HRS	132.6	133.8	146.7	92.4	174.1
HR	135.2	133.8	146.7	92.4	174.1
HRS	168.6	158.5	187.8	147.3	201.7
HRS	208.1	181.2	217.4	207.4	229.8
HRS	222.7	221.9	255.2	207.4	246.2

En donde HRS, corresponde a Cinta helicoidal-Tornillo y HR a Cinta helicoidal.

Espinosa et al. (1997), llevaron a cabo un estudio sobre las propiedades hidrodinámicas de un sistema de agitación dual; en este caso se trabajó conjuntamente con sistemas de gaseo. El sistema de agitación consistía de un eje en el cual estaban acoplados una cinta helicoidal y una turbina; se trabajó con fluidos no newtonianos.

El sistema experimental consistió en un tanque cilíndrico en el cual estaba acoplado en la tapa un sistema mecánico que permitía variar la relación de velocidad entre ambos impulsores utilizados. El torque fue medido con un torquímetro acoplado a la flecha del motor y la velocidad con un tacómetro óptico. Los parámetros reológicos fueron evaluados en un reómetro Haake con geometría de cono y placa.

La importancia de este trabajo, es que se obtuvieron algunos de los parámetros hidrodinámicos de un tipo de agitador mixto nuevo; se obtuvieron valores como el  $K_p$  del mismo, etc. Estos resultados son de relevancia pues permiten proponer nuevos sistemas para solucionar problemas presentes en ciertas áreas industriales, además de que son un impulso para investigaciones posteriores que pueden involucra otras variables de importancia.



*Figura 1.20. Curva de potencia de fluidos no newtonianos y newtonianos (Brito et al, 1997).*

### 1.2.2. PATRONES DE FLUJO

Las investigaciones llevadas a cabo sobre los sistemas de agitación, además de que consideran los parámetros de consumo de potencia, involucran algunas otras características hidrodinámicas como los patrones de flujo que se forman en el proceso. Los estudios que son llevados a cabo sobre el particular son de utilidad en una gran cantidad de aplicaciones, por ejemplo en el caso en que investigaciones posteriores emplean los resultados de dichos estudios, para proponer nuevas alternativas o para explicar los comportamientos que se tienen en los sistemas de mezclado. Del conocimiento de los patrones de flujo se puede llegar a conocer los espacios muertos que existen en el sistema de agitación, y con ello poder tener un mejor control sobre el proceso.

Otra importancia que tiene el estudio del patrón de flujo en un proceso, es que permite realizar escalamiento a otros procesos o a otro nivel, (Placek et al, 1986).

De acuerdo con Espinosa (1998), los patrones de flujo presentes en los tanques de mezclado están íntimamente relacionados con los fenómenos de transferencia de cantidad de movimiento.

Los patrones de flujo en un tanque agitado, generalmente son muy complejos, están formados en tres dimensiones presentando en algunos casos (en función a algunas variables como la velocidad de agitación), vórtices que modifican de esta forma el patrón existente a otras velocidades; desde luego el patrón de flujo presentado en el régimen laminar cambia en la transición y aun más en la turbulencia.

En las aplicaciones en las cuales se han diseñado sistemas de agitación con múltiples impulsores, los patrones de flujo son generalmente muy diferentes a los que forman cada uno de ellos individualmente, especialmente cuando son diferentes entre sí.

### 1.2.2.1. ESTRATEGIAS EXPERIMENTALES EN TURBINAS

Sachs y Rushton (1954), realizaron los primeros estudios sobre patrones de flujo, utilizaron un impulsor de tipo turbina de hojas planas o turbina Rushton. La investigación utilizó una técnica fotográfica. Reportaron la presencia de patrones de flujo axiales, y de variaciones de velocidad en la componente radial, cuando existía un ángulo en la placa de la turbina.

Aiba (1958), llevó a cabo un estudio comparativo de los patrones de flujo desarrollados por diferentes agitadores; utilizó turbinas, propelas y placas; en la comparación también observó el efecto que tenía en el patrón la presencia de bafles. Para realizar esta investigación se utilizó un trazador radioactivo, detectando las variaciones de posición con un tubo Geiger, y realizando con ello un mapa de posiciones del trazador. Figura 1.21.

Cutter (1966), estimó que aproximadamente el 70 % de la energía suministrada al sistema de agitación, era disipada en la región cercana a la turbina, con la consecuente disipación de la energía remanente en la parte restante del sistema.

La formación del vórtice, fue descrito ampliamente por van't Riet y Smith (1973), estos autores utilizaron una técnica fotográfica en la cual montaron la cámara en un plato giratorio sincronizado con el movimiento de el impulsor. En este estudio se utilizó, además, un trazador óptico.

Placek et al. (1986), realizó un estudio utilizando balances de energía en el sistema, al mismo tiempo que para la obtención de conclusiones obtuvo experimentalmente los perfiles de velocidad, utilizando un sistema de medición de presión tubo Pitot, con ello, obtuvo los diferentes patrones de flujo tanto en régimen laminar como turbulento para una turbina Rushton. Figura 1.22.

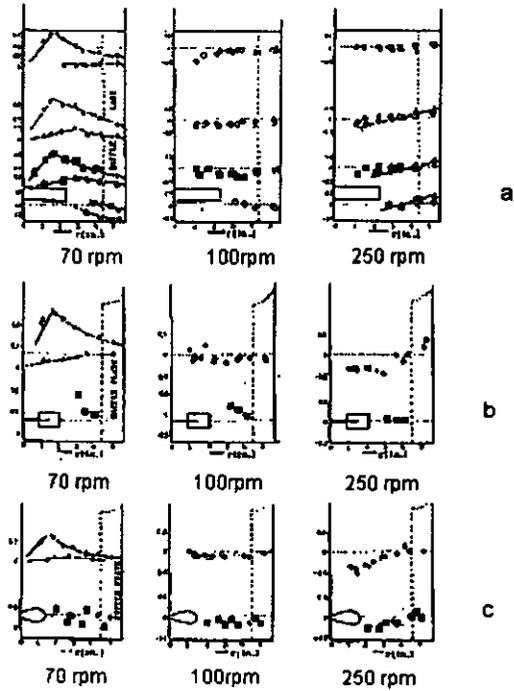


Figura 1.21 Patrones de flujo desarrollados en agua por:

a) Turbina plana, b) Turbina Rushton,

c) Propela.

La línea gruesa muestra el patrón con baffles.

(Metzner y Otto, 1957).

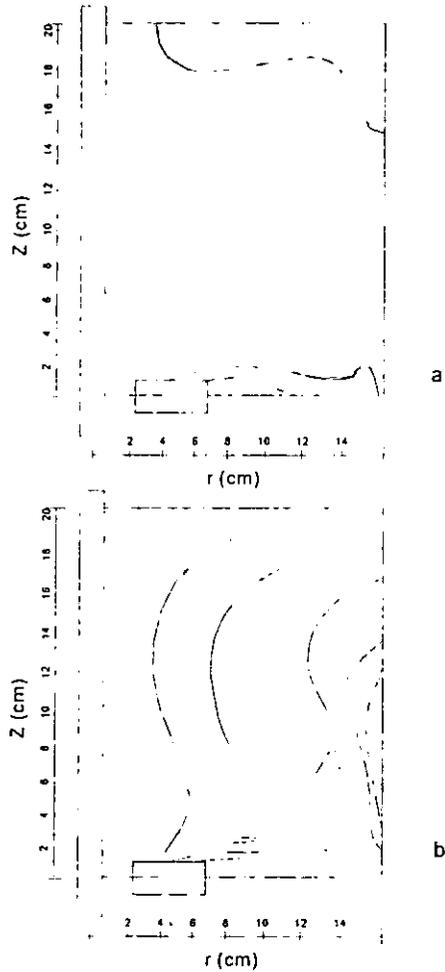
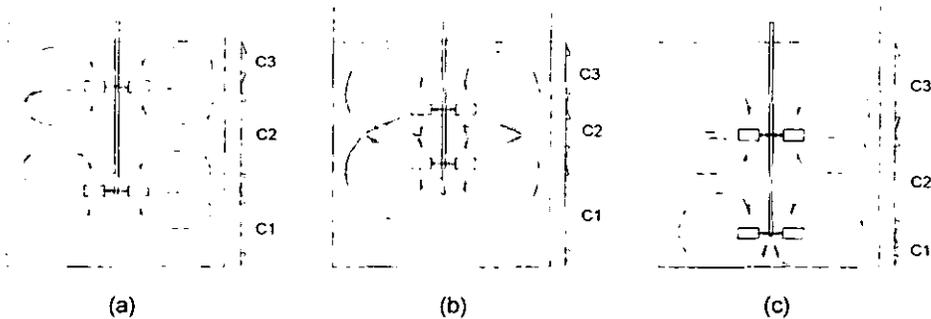


Figura 1.22. Patrones de flujo de turbina Rushton para:  
a) flujo laminar y b) flujo turbulento  
(Placek et al, 1986).

Rutherford et al. (1996), realizaron un estudio sobre las variaciones del patrón de flujo producidas por la presencia de dos turbinas en el mismo sistema de agitación; en este estudio se hicieron variaciones en la colocación de los impulsores. La conclusión obtenida de este estudio fue que la colocación de los impulsores en un sistema de agitación múltiple ejerce una influencia marcada sobre los patrones de flujo desarrollados así como en el consumo de potencia que se tiene en el sistema, tal como puede verse en la figura 1.23 (a),(b),(c), en donde se tienen diferentes posiciones en la colocación de ambas turbinas.



*Figura 1.23. Patrón de flujo en un sistema de dos turbinas Rushton.  
(Rutherford et al, 1996).*

Armenante et al (1996), utilizando una técnica que aprovecha el efecto Laser-Doppler, realizaron de igual forma un estudio sobre un sistema de agitación múltiple utilizando dos turbinas, adicionalmente se realizó una simulación numérica del sistema. De los resultados obtenidos, los autores concluyeron que el patrón de flujo se daba predominantemente en la componente axial y tangencial.

La presencia de la turbina superior altera considerablemente el patrón de flujo con respecto al sistema con una sola turbina, produciendo recirculación vertical entre ambas turbinas y reduciendo significativamente la circulación por debajo de la turbina inferior.

Los resultados conjuntos de la simulación numérica y utilizando experimentalmente el efecto Laser-Doppler, dieron como resultado las siguientes gráficas de los patrones de flujo Figura 1.24

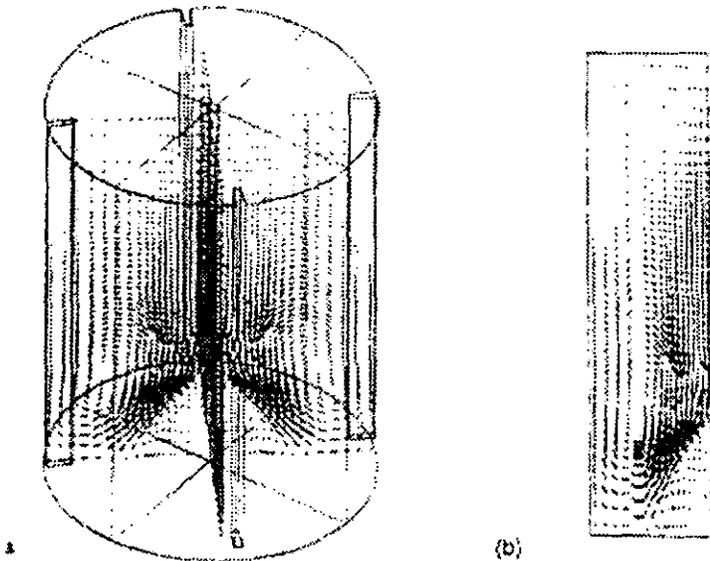


Figura 1.24. Patrón de flujo por simulación numérica:

a) vista general, b) vista de perfil.

(Armenante et al, 1996).

Lamberto et al (1996), utilizando una técnica colorimétrica y un sistema de agitación de una sola turbina tipo Rushton, trabajaron en régimen laminar, concluyendo de sus observaciones que se tienen zonas de mezclado deficiente por arriba y por debajo del impulsor; la técnica colorimétrica muestra la formación de una caverna de agitación eficiente que concuerda con lo ya reportado por Cutter (1966), sobre la dispersión de energía en las cercanías del impulsor. Otras Investigaciones como las llevadas a cabo por Elson (1990) y Nomura et al. (1996), mostraron que este comportamiento era independiente de la geometría del tanque.

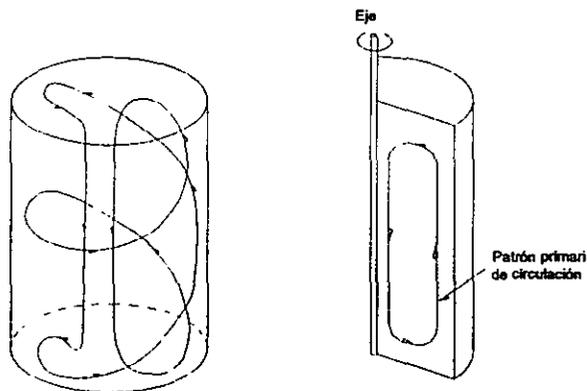


*Figura 1.25. patrones de flujo por colorimetría en:  
a) régimen laminar b) régimen turbulento  
(Lamberto et al, 1996).*

### 1.2.2.2. ESTRATEGIAS PARA IMPULSORES DE PROXIMIDAD

Las aplicaciones que han tenido los impulsores de proximidad tales como los helicoidales, desde su introducción, han sido muy diversos, tanto para fluidos newtonianos como para los no newtonianos. Dependiendo de las viscosidades manejadas y las condiciones de operación, se puede producir un régimen de flujo laminar. Comúnmente este tipo de impulsores se operan a velocidades de operación bajas, entre 30 y 100 RPM, esto debido a los altos consumos de potencia que se pueden obtener, a mayores condiciones de velocidad.

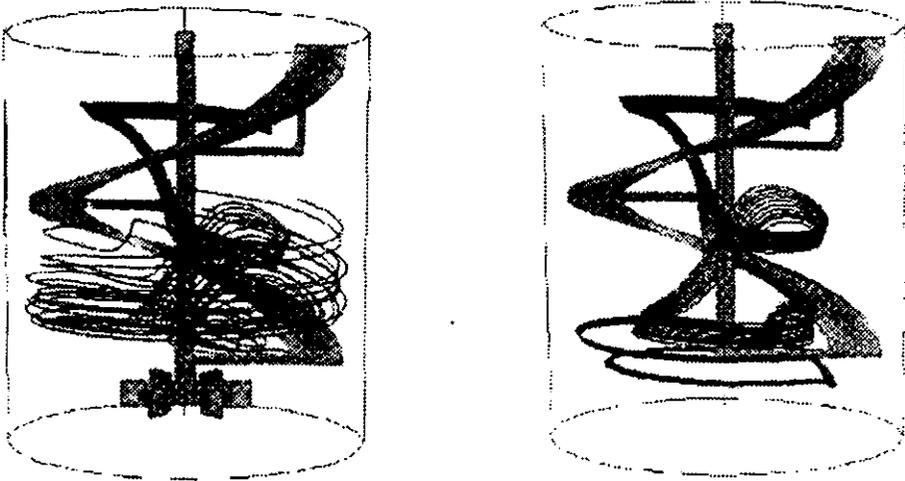
Nagata et al. (1957) llevaron a cabo los primeros estudios sobre los patrones de flujo que se desarrollan en un sistema de agitación con cinta helicoidal. La importancia de este estudio es que mostró el efecto del bombeo que se realiza en el interior del tanque por la acción de la agitación, es decir que el descenso del fluido es girando alrededor de la flecha y el ascenso es por la periferia del impulsor en el espacio anular a la pared, como se observa en la figura 1.26.



*Figura 1.26. Patrón de flujo desarrollado por una cinta helicoidal. (Nagata et al, 1957).*

Takahasi et al. (1982), utilizando las técnicas de visualización por medio del efecto de cambio de coloración en cristal líquido, dedujo, que las componentes principales en el patrón de flujo desarrollado por un impulsor de cinta helicoidal, eran principalmente axiales y radiales.

Brito et al (1992), utilizando técnicas de simulación 3-D, observaron que aunque la componente axial es la predominante para el caso de cintas helicoidales, no se observa de igual forma en fluidos de alta viscosidad. Otro estudio, Tanguy et al. (1996), en el cual también se utilizó la simulación numérica 3-D, utilizó un sistema dual como impulsor, formado por una cinta helicoidal y una turbina. Ver figura 1.27.



*Figura 1.27. Patrones de flujo por simulación 3D,  
a) generado por el impulsor dual, b) generado por la cinta individual.  
(Tanguy et al, 1996).*

### 1.2.3. TIEMPOS DE MEZCLADO

El tiempo de mezclado  $\theta_m$  es el tiempo requerido para que un sistema desarrolle el grado de homogenización deseado. Por lo tanto el conocimiento del tiempo de mezclado es necesario cuando se esta evaluando alternamente el grado de homogenización. Los métodos mas comunes de evaluación son el método scieren y el método colorimétrico químico, (Lamberto et al, 1995).

Cada valor de tiempo de mezclado o característica de potencia, es característico solo para la geometría en particular, las proporciones del tipo y sistema de agitación, etc.

La figura 1.28., muestra los valores obtenidos de tiempo de mezclado para diferentes tipos de agitadores, en su evaluación se empleo el método colorimétrico químico.

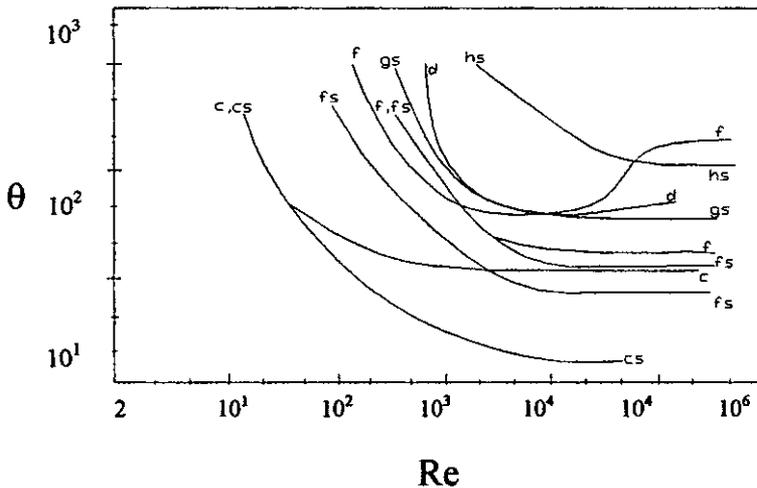


Figura 1.28. Tiempos de mezclado para: cs)hoja, cs)ancla, d)hélice, f) y fs) turbinas, gs)propela, hs)difusor. Los marcados con s, son con baffles.

(Charm, 1978).

#### 1.2.4. OPERACIONES DE MEZCLADO EN FLUIDOS NEWTONIANOS

La mayoría de los estudios llevado a cabo sobre el mezclado, se han hecho para fluidos que cumplen con la ley de Newton o newtonianos  $\tau = \mu\dot{\gamma}$ , y son solo función de la temperatura. Sin embargo, existen fluidos que no cumplen exactamente con esta ley, los cuales son también función de la velocidad de corte, y que por otro lado son los fluidos que se emplean en una gran mayoría de procesos, conocidos como fluidos no newtonianos.

Dentro de las investigaciones llevadas al cabo, una de las problemáticas iniciales es representada por el conocimiento de la velocidad de cizalla al interior del tanque, pues esta es función tanto de la geometría del impulsor, y de la posición, además claro, de la temperatura.

Metzner y Otto (1957), fueron los primeros en llevar a cabo investigaciones sobre el consumo de potencia de estos fluidos en un agitador de turbina. Encontraron que la velocidad de corte media era proporcional a la velocidad de rotación del impulsor mediante la ecuación:

$$\dot{\gamma} = K_s N \quad (1.8)$$

en donde  $K_s$  es característico de cada geometría de agitador en particular.

El número de Reynolds para fluidos pseudoplásticos, se convierte en:

$$Re = \frac{\rho N d^2}{K \dot{\gamma}^{n-1}} \quad (1.9)$$

La estrategia experimental utilizada por estos autores, fue hacer una analogía de flujo Couette, basándose en la comparación de viscosidades y consumo de potencia.

Cuando la viscosidad decrece al aumentar la velocidad de corte el fluido es denominado pseudoplástico, en el caso opuesto el fluido es denominado dilatante. Este tipo de fluidos cumplen con la ley de Ostwad de la potencia, por lo cual son

conocidos como fluidos de la potencia:  $\tau = k \dot{\gamma}^n$ , en donde  $k$  y  $n$  son las constantes reológicas conocidas como índice de consistencia e índice de comportamiento respectivamente.

Utilizando la velocidad rotacional,  $N$ , en analogía con la velocidad de corte, Bourne y Butler (1969), desarrollaron otra alternativa, resultando de la ecuación 1.9, un número de Reynolds generalizado:

$$Re_{gen} = \frac{\rho N^{2-n} d^2}{K} \quad (1.10)$$

De esta forma el cálculo de consumo de potencia para fluidos no newtonianos, se realiza empleando la siguiente expresión:

$$K_p(n) = N_p Re_{gen} = \frac{P}{N^{1-n} d^3 K} \quad (1.11)$$

Para fluidos Viscoelásticos las características de potencia, pueden también ser descritas como una relación  $N_p = f(Re)$ . Adicionalmente se menciona que los parámetros para evaluar las propiedades viscoelásticas son necesarios solo cuando la relación de la tensión de esfuerzo normal es mas bajo de 2.

Investigaciones mas recientes, han llevado a la conclusión de que el valor de  $K_s$  no necesariamente es una constante, tal como se considera generalmente. Brito et al (1992), observó que para fluidos altamente pseudoplásticos ( $n < 0.3$ ),  $K_s$  es función de las propiedades de flujo. En dicho estudio se determinó que para el cálculo de  $K_s$ , en agitadores helicoidales,  $K_s$  se expresa como.

$$K_s = \left( \frac{K_p(n)}{K_p} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (1.12)$$

Haciendo la consideración de este concepto y del concepto clásico de Metzner y Otto (1957), se ha desarrollado el concepto de velocidad de corte efectiva ( $\gamma_e$ ), Brito et al (1992):

$$\gamma_e = \left[ \frac{Kp(n)}{Kp} \right]^{\frac{1}{n-1}} N \quad (1.13)$$

La cual puede a su vez ser utilizada para el cálculo del número de Reynolds efectivo:

$$Re_e = \frac{\rho N d^2}{m(\gamma_e)^{n-1}} \quad (1.14)$$

Para una mejor comprensión ver el anexo N sobre cálculo de  $K_s$ .

Como se ha podido observar la determinación de las características de flujo de un sistema implica el conocimiento de diversos valores tanto experimentales como teóricos. Se debe conocer el comportamiento reológico del fluido para poder aplicar el análisis matemático adecuado; así como las características de flujo, el tipo de régimen, etc.

### 1.3. TRANSFERENCIA DE CALOR EN TANQUES AGITADOS

La transferencia de calor es el cambio de posición de una cierta cantidad de energía en forma de calor, de un cuerpo a otro o de un punto a otro en un mismo cuerpo. Dicho cambio o transporte de energía se da por la existencia de un gradiente de temperatura.

La forma en que este tipo de transporte puede ser llevado a cabo, es por medio de tres mecanismos conocidos: la conducción en que la transferencia se da entre sólidos y en líquidos y gases que se encuentran en reposo; la razón principal de que la transferencia se dé es por el choque de partículas de alta energía (con una mayor cantidad de calor) a otras de menor. La convección se da en gases y en líquidos que se hayan en movimiento, aquí el choque de las moléculas se da de forma diferente a la conducción, ya que de antemano, las partículas de dichos cuerpos se hayan libres, con respecto a las otras del mismo cuerpo. La radiación ocurre debido a la emisión de ondas electromagnéticas que viajan de un sólido a través de un gas.

Para el estudio de la transferencia de calor, se suelen hacer dos consideraciones de importancia, basadas en el balance energético del sistema sobre el cual se haga el estudio. Puede considerarse que para algunos casos, la velocidad con la cual entra la energía al sistema sea igual a la velocidad con la cual sale, por lo que no existe acumulación; este caso es el llamado estado estable. Por otro lado tenemos que cuando se acumula energía en el sistema, llamado también estado inestable o transiente. En otras palabras, se tiene estado estable, cuando no existe variación de temperatura con el tiempo, e inversamente en el estado inestable; se debe hacer notar desde luego, que después de un cierto tiempo en que el sistema es sometido a un transferencia de calor, este pasa del estado inestable al estable.

Un punto de importancia para el estudio particular del mecanismo de convección, es que ésta se puede dar en dos formas, la llamada natural, en la cual no se requiere de una fuerza externa (mecánica por ejemplo), para que se dé la transferencia, en este caso el movimiento del fluido esta originado por el cambio de densidad debido al calentamiento (o enfriamiento), que sufre; contrariamente, en la convección "forzada", el movimiento del fluido se da por el hecho de ejercer una fuerza externa sobre este; de forma que la transferencia del calor es mas rápida.

Una gran variedad de procesos químicos, biológicos y alimenticios son efectuados en tanques de mezclado empleando diferentes tipos de impulsores, tales como paletas, turbinas, cintas helicoidales, anclas, propelas. En la gran mayoría de estos procesos, es necesario transferir calor durante el proceso, enfriando o calentando el contenido de los tanques, tal es el caso de las fermentaciones microbianas, la concentración de jugos, la preparación de soluciones azucaradas, el control de reacciones poliméricas, etc.

El proceso de calentamiento se lleva acabo utilizando los equipos adicionales del proceso de mezclado, usualmente las superficies de transferencia de calor que se utilizan son serpentines interiores al tanque o chaquetas exteriores al mismo.

La problemática para este tipo de procesos, desde el punto de vista de la transferencia de calor, se centra en la determinación de los coeficientes de película ( $h_i$ ), del lado del fluido a mezclar. Este coeficiente es una propiedad de las características del fluido tanto fisicoquímicas como reológicas, así como de las características de la agitación.

Dentro de las investigaciones llevadas acabo para determinar el coeficiente de película, (Welty, 1972; Holman, 1972; Perry et al 1989), se han obtenido por análisis dimensional, números adimensionales que representan ciertas características del sistema, algunos de ellos son:

$$Nu = \frac{h_1 D}{k} \quad (1.15)$$

Nu es el número de Nusselt; mide la relación de resistencias a la transferencia de calor

$$Re = \frac{d^2 N \rho}{\mu} \quad (1.16)$$

Re Es el número de Reynolds; indica la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (1.17)$$

Pr es el número de Prandtl; agrupa las características físicas del fluido, e indica la velocidad con la cual se transfiere el calor.

$$Vi = \frac{\mu}{\mu_w} \quad (1.18)$$

Vi es la relación de viscosidades, entre la del fluido al interior y el de la pared del tanque.

Existe una forma general de agrupamiento de dichos números adimensionales, el cual en su forma general es la siguiente:

$$Nu = \alpha Re^\beta Pr^\gamma Vi^\delta \quad (1.19)$$

Donde  $\alpha, \beta, \gamma$  y  $\delta$  son parámetros característicos de cada sistema de mezclado en particular.

A pesar de que el trabajar con fluidos no newtonianos, implica realizar una serie de correcciones de importancia sobre las ecuaciones antes mencionadas, se han reportado trabajos sobre el particular desde mediados de los años 60, sobre todo para fluidos del modelo de la ley de la potencia.

Carreau et al, (1966), propusieron una correlación para el caso de tanques de agitación con un impulsor tipo turbina Rushton en régimen turbulento, la ecuación que se obtuvo es la siguiente:

$$Nu = 3.41Re^{2/3} Pr^{1/3}$$

La cual se determino para el caso de calentamiento; para el caso de enfriamiento, se determino la siguiente ecuación:

$$Nu = 3.41Re^{2/3} Pr^{1/2} \quad (1.20)$$

Dichas ecuaciones se cumplen para las cuando se tienen las siguientes condiciones:  $0.343 < n < 0.633$ ,  $100 < Pr < 800$  y  $100 < Re < 5000$

Es de notar que para estas ecuaciones, las variaciones de viscosidad que existen en el seno del líquido con respecto a las que se tiene en la pared del tanque, no fueron consideradas, la no newtonianidad del fluido se considera en el recálculo del Reynolds que involucra los parámetros  $k$  y  $n$ ; sin embargo, Uhl (1967), introdujo el factor de corrección de la variación de viscosidades antes mencionada, quedando la ecuación de la siguiente forma para calentamiento:

$$Nu = 1.474Re^{0.7} Pr^{0.33} \mu_i^{0.24n} \quad (1.21)$$

Otros estudios mas recientes, como el efectuado por Haam en 1993, para condiciones de turbulencia en calentamiento,  $16000 < Re < 273000$ , encontraron la siguiente correlación:

$$Nu = 0.314Re^{2/3} Pr^{1/3} \mu_i^{0.14} \quad (1.22)$$

Dicho estudio introdujo además en la ecuación, la relación geométrica  $b/D$  y  $d/D$ , la ecuación resultante fue la siguiente:

$$Nu = 0.505 Re^{0.673} Pr^{1/3} Vi^{0.14} \left(\frac{b}{D}\right)^{-0.045} \left(\frac{d}{D}\right)^{-0.048} \quad (1.23)$$

Aunque se llegó a la conclusión de las diferencias mostradas por los coeficientes de desviación en esta última ecuación, eran superiores a las de la antecedente, concluyendo, por tanto, que su injerencia no era conveniente.

Para el caso de los impulsores de proximidad, tales como palas, hélices, etc. Se han desarrollado de manera análoga, ecuaciones para el cálculo de los coeficientes de película. Inicialmente se realizaron análisis dimensionales, de las ecuaciones de transferencia que se veían involucradas en el proceso; posteriormente se trabajó con el sistema de agitación; (Saravacos y Moyer, 1967), empleando impulsor tipo ancla, determinaron la correlación siguiente para un fluido que sigue la ley de la potencia:

$$Nu = 0.55 Re^{0.66} Pr^{0.33} Vi^{0.14} \quad (1.24)$$

Se han desarrollado otras ecuaciones que contemplan algunas características adicionales, tales como el concepto dado en 1957 por Metzner y Otto, sobre el  $K_s$ ; en otras ocasiones se han desarrollado ecuaciones para otros tipos de impulsores; en la mayoría de los casos el cálculo del coeficiente de película se realiza empleando el método de Wilson, tal como se menciona por Nuñez (1996), y el cual se presenta en el Anexo 3.

Es de suma relevancia hacer notar que los de criterios utilizados para la determinación de las diferentes correlaciones obtenidas aún para un mismo tipo de impulsor, implican la existencia de diferencias notables entre los valores obtenidos por dichas correlaciones; Nuñez (1996), menciona que pese manejar los mismos intervalos de los número de Reynolds y Prandtl, los resultados obtenidos son diferentes. Aunado a esto existe la controversia entre los diferentes autores sobre la homogeneidad térmica del sistema; Shamlou y Edwards (1986) proponen una diferencia de 1°C entre la temperatura del interior del tanque y la de la pared,

para considerar homogéneo al sistema, en tanto que la ecuación obtenida por Nagata en 1972, se basa en la diferencia de 0.8°C.

Como ya se ha mencionado, los estudios sobre la transferencia de calor son prioritariamente efectuados con fluidos newtonianos, sin embargo, la importancia en la industria de los fluidos no newtonianos es alta. Es necesario resaltar que este tipo de fluidos presentan casi siempre, viscosidades altas, debido a ello el régimen que se mantiene generalmente es laminar.

En la transferencia de calor de un fluido con régimen laminar, el mecanismo que se da principalmente es la conducción. No obstante, cuando las velocidades de flujo y las viscosidades son bajas, pueden existir efectos de convección natural. Nuñez et al. (1997), realizó un estudio en el cual trabajo con agitadores remotos, tipo ancla y cinta helicoidal para fluidos tipo ley de la potencia. Se determinó que los gradientes de temperatura eran mas pronunciados en el impulsor de ancla y concluyó que este tipo era el menos adecuado de los estudiados para llevar a cabo el proceso de transferencia de calor. Evaluó el impacto de la convección natural usando primeramente la relación clásica  $Gr/Re^2$ , aunque no fue la mas adecuada. Por ello propuso una nueva correlación, en la cual se da mayor importancia a la viscosidad y la fuerza boyante para el caso de los fluidos no newtonianos y en sistema no isotérmico.

La relación  $Gr/Re^2$  o numero de Richardson (Ri), permite estimar la contribución de la convección natural al proceso de calentamiento en un tanque agitado.

El número de Grashof clásico se define como:

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta \Delta T l^3}{\eta^2} \quad (1.25)$$

De acuerdo con lo estudios por Fand y Keswani (1973), cuando el número de Richardson se encuentra en el rango de  $0.5 < Ri < 2$  entonces:

1. El mecanismo de transferencia de calor que se da predominantemente es por convección forzada.

2. Un error del 10 % en la estimación del coeficiente de transferencia de calor debería ser considerado si el efecto de la convección natural no se toma en cuenta.

Las evidencias experimentales mostradas en dicha investigación llevaron a definir un nuevo número de Grashof, en el cual se consideran las fuerzas boyantes y las viscosas, así como las características del sistema de agitación. La correlación definida fue:

$$Gr = \frac{\rho g \beta \Delta T d}{\eta_e N} \quad (1.26)$$

En donde  $\eta_e$  es la viscosidad de proceso.

Es importante notar que si  $Gr > 1$ , las fuerzas viscosas y la convección natural no deberían ser despreciadas.

La conclusión aportada por este trabajo, es que en el estado transiente de transferencia de calor, se da la convección natural y, por tanto, debería ser considerada en los estudios llevados a cabo; así mismo muestra la importancia de los parámetros reológicos en los números adimensionales de sistemas de agitación y calentamiento.

Aunque cuando la viscosidad es alta, para este tipo de fluidos, la convección natural se reduce de manera notable. Geankoplis (1982), menciona que el valor de la constante reológica  $n$ , no varía de manera apreciable en un amplio rango de temperatura; contrariamente al índice de consistencia  $K$ , que si se ve influenciado por la temperatura.

En los procesos químicos o biológicos en los cuales la transferencia de calor se lleva a cabo en un sistema de agitación, se monta adicionalmente a dicho sistema, superficies de transferencia de calor, como chaquetas o serpentines, que son los elementos mediante los cuales el fluido a mezclar se calienta o enfría según el caso.

En la relación mostrada al principio de este capítulo, de agrupamiento de números adimensionales con respecto al número  $Nu$  (ecuación 1.19); en este

caso, todas las propiedades se evalúan a la temperatura general del mismo, excepto  $\mu_w$ , que corresponde a la temperatura de la pared  $T_w$ ,

Algunos investigadores han realizado para diferentes tipos de impulsores, experimentos que han permitido encontrar los coeficientes de dicha ecuación; Geankoplis (1982), muestra algunos de estos valores:

1. Agitador de paletas sin deflectores

$$a = 0.36, \beta = 2/3, \delta = 0.21, \text{Re} = 300 \text{ a } 3 \times 10^5$$

2. Agitador de turbina de paletas planas sin deflectores

$$a = 0.54, \beta = 2/3, \delta = 0.14, \text{Re} = 30 \text{ a } 3 \times 10^5$$

3. Agitador de turbina de paletas planas con deflectores

$$a = 0.74, \beta = 2/3, \delta = 0.14, \text{Re} = 500 \text{ a } 3 \times 10^5$$

4. Agitador de ancla sin deflectores

$$a = 1.0, \beta = 1/2, \delta = 0.18, \text{Re} = 10 \text{ a } 300$$

$$a = 0.36, \beta = 2/3, \delta = 0.18, \text{Re} = 300 \text{ a } 4 \times 10^4$$

5. Agitador de cinta helicoidal sin deflectores

$$a = 0.633, \beta = 1/2, \delta = 0.18, \text{Re} = 8 \text{ a } 10^5$$

En esta referencia se considera el valor de  $\gamma$  como una constante igual a 1/3.

También es importante destacar que cuando se está llevando a cabo un diseño, se debe conocer el valor del coeficiente global de transferencia de calor  $U$ .

Algunos de los valores encontrados para tanque agitados, se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Valores de  $U$ , para tanques agitados.

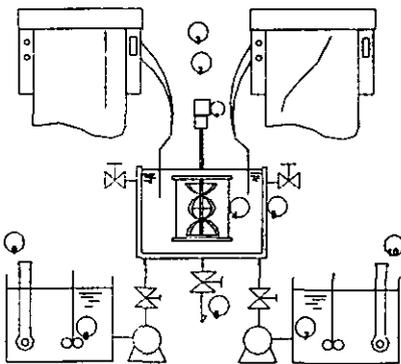
(Geankoplis, 1993).

Fluido en la chaqueta	Fluido en el recipiente	Material de las paredes de Agitación	Agitación	U	
				$\frac{\text{Btu}}{\text{Hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
Vapor de agua	Agua	Cobre	Agitación simple	150	852
Vapor de agua	Pasta	Hierro fundido	Raspadores dobles	125	710
Vapor de agua	Agua en ebullición	Cobre	Ninguna	250	1420
Vapor de agua	Leche	Hierro fundido porcelanizado	Agitación simple	300	1 700
Agua caliente	Agua Fria	Hierro fundido porcelanizado	Ninguna	70	398
Vapor de agua	Puré de tomate	Metal	Agitación vigorosa	30	170

### 1.3.1. ESTRATEGIAS EXPERIMENTALES UTILIZADAS

Kuriyama et al. (1981), Investigaron las distribuciones de temperatura que se dan en un tanque agitado utilizando un impulsor tipo cinta helicoidal; la estrategia experimental utilizada para este estudio fue la siguiente. Utilizaron las propiedades del cristal líquido, el cual cambia de color dependiendo de su temperatura. Experimentalmente utilizaron mezclas de cristal líquido encapsulado en gelatina. Dichas cápsulas fueron de 10 micras de diámetro y densidad  $1.04 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

El tanque agitado fue llenado con el líquido, e inmerso en un baño de temperatura constante o temperatura inicial deseada. El estado inestable de transferencia de calor comenzó cuando el agua del baño, fue reemplazada con agua de calentamiento o enfriamiento según el caso.



1. Motor de vel. variable
2. Termopares
3. Registrador
4. Tanque agitado
5. Baño de T. Constante
6. Válvula de drenado
7. 8. Tanque de almacenamiento
9. 10. Calentador.

Figura 1.29. Montaje experimental de técnica de cristal líquido (1).  
(Kuriyama et al, 1981).

Tanto el tanque de agitación como la cinta helicoidal, estaban hechas de material transparente.

Para la observación de los gradientes de temperatura se montó un sistema óptico, el cual consistía de una lámpara de 300 W de xenón, produciendo un haz de luz de 3mm de espesor y 100 mm de altura. El haz de luz pasando a través del cristal líquido, produce que en la pared del tanque puedan observarse las distribuciones de temperatura. La mejor observación se obtuvo en un ángulo de 45° entre el sistema de iluminación y la cámara fotográfica. Las placas fotográficas se obtuvieron en exposición larga de 1 seg.

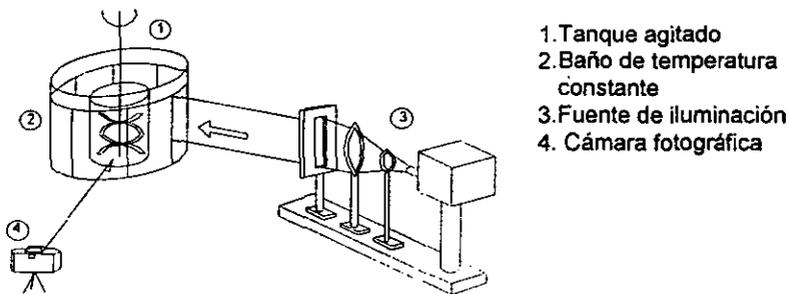


Figura 1.30. Montaje experimental Técnica de cristal líquido (2).  
(Kuniyama et al, 1981).

Nuñez (1996), quién investigó sobre el efecto de la convección natural en tanques agitados, empleo un tanque enchaquetado de acero inoxidable, utilizando fluidos no newtonianos (soluciones de xantana) y agua de calentamiento 60 °C. Para evaluar las distribuciones de temperatura utilizó termopares y un sistema de adquisición de datos hecho ex profeso.

La colocación de los sensores de temperatura fueron en posición radial y axial, el análisis que dio dicho resultado, fue llevado a cabo utilizando números adimensionales con la finalidad de evaluar el impacto de la convección natural en el sistema. De este estudio se obtuvo como resultado la propuesta de un nuevo número de Grashof, como ya se mencionó.

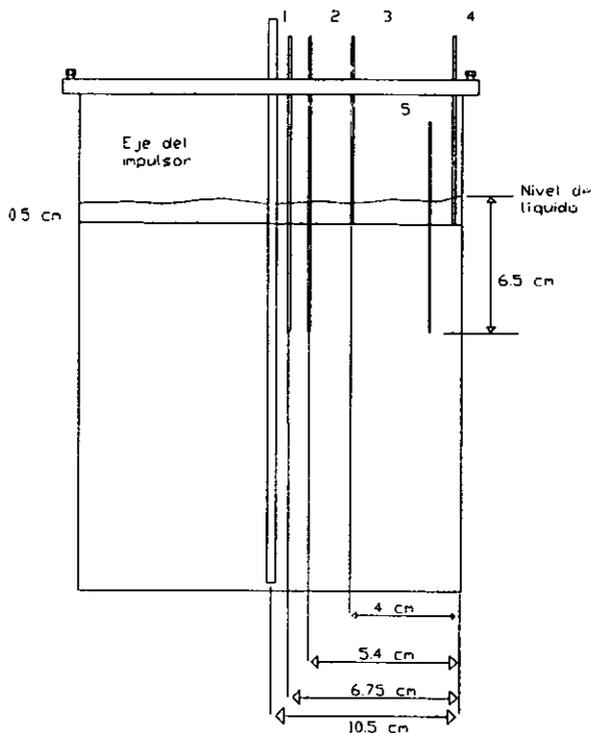


Figura 1.31. Montaje experimental, utilizando termopares.  
(Nuñez, 1996).

Existen algunas otras alternativas, que permiten tener un mayor control sobre el proceso tanto la transferencia de calor como en el mezclado, de igual forma que en lo que se refiere a la adquisición de los datos que sean de interés. La tendencia experimental actual, está orientada a la automatización de los sistemas por medio de equipos de computo adecuados. Es posible mediante tarjetas de captura de datos, obtener las respuestas de interés de manera inmediata y puntual; adicionalmente se ha desarrollado software específico que permite la manipulación de los datos, obteniendo con mayor precisión resultados en menor tiempo.

## 1.4. GENERALIDADES DE REOLOGÍA

La reología ha sido definida como la deformación de los objetos, bajo la influencia de esfuerzos aplicados a ellos. Los sólidos como los líquidos pueden ser sometidos a un gran número de diferentes tipos de fuerzas; tenemos el caso de un fluido que es bombeado de un recipiente y se transporta por medio de una tubería, las operaciones en las cuales un fluido es sometido a una fuerza de giro como en el caso del mezclado, etc.

En el caso de flujo en tuberías, a velocidades bajas, el fluido tiende a fluir sin mezclado lateral y las capas adyacentes se resbalan unas sobre de otras. En este caso no hay corrientes cruzadas perpendiculares a la dirección del flujo, ni tampoco remolinos de fluido; a este comportamiento del fluido se le conoce como flujo en *régimen laminar*. Cuando se tienen velocidades mas altas, se forman remolinos en el interior del flujo, lo que conduce a un mezclado lateral; a este tipo de flujo se le conoce como *régimen turbulento*.

En el caso de las operaciones en las cuales el interior del fluido esta sometido a diferentes fuerzas de movimiento, el comportamiento del fluido es diferente, tal es el caso del flujo en el interior de un tanque de mezclado. Esto esta en función a la geometría del agitador, del tanque, y al comportamiento reológico del sistema. Por lo general, los patrones de flujo desarrollados, son función de la velocidad de agitación, de la geometría del agitador y de la composición o comportamiento del fluido, además, claro de la temperatura que influye en dichas características reológicas. De esta forma los regímenes laminar y turbulento, se alcanzan en otros niveles de velocidad que en el caso del flujo en tuberías.

Con respecto a la viscosidad, un fluido puede diferenciarse de un sólido por su comportamiento cuando se le somete a un esfuerzo (fuerza por unidad de área). Un sólido elástico se deforma en magnitud proporcional al esfuerzo aplicado. Sin embargo, cuando un fluido se somete a un esfuerzo aplicado similar, la deformación continúa, esto es, el flujo aumenta al incrementarse el esfuerzo. Un fluido exhibe resistencia a este esfuerzo. La viscosidad es la propiedad de un fluido que da lugar a fuerzas que se oponen al movimiento relativo de capas

adyacentes en el mismo. Estas fuerzas viscosas se originan a partir de las que existen entre las moléculas del fluido y son de carácter similar a las fuerzas cortantes de los sólidos.

Se ha determinado en forma experimental para muchos fluidos que la fuerza  $F$  en Newtons es directamente proporcional a la velocidad  $\Delta v$  en m/s, al área  $A$  en  $m^2$  de la placa usada e inversamente proporcional a la distancia  $\Delta y$  en m. Expresada con la ley de la viscosidad de Newton cuando el flujo es laminar, como:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (1.28)$$

donde  $\mu$  es una constante de proporcionalidad llamada viscosidad del fluido, en Pa. s. Cuando  $\Delta y$  tiende a cero y utilizando la definición de derivada,

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy} \quad (1.29)$$

donde  $\tau = F/A$ , es el esfuerzo cortante en  $N/m^2$ .

#### 1.4.1. FLUIDOS NEWTONIANOS

Los fluidos que obedecen la ley de la viscosidad de Newton, (ecuación 1.29), se llaman fluidos newtonianos. En este tipo de fluidos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante  $\tau$  y el gradiente de velocidad  $dv/dy$  (velocidad de corte o de cizalla). Esto significa que la viscosidad  $\mu$  es constante e independiente de la velocidad cortante.

#### 1.4.2. FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Los fluidos no newtonianos no cumplen con la ley de Newton (ecuación 1.29). En estas condiciones una gráfica de  $\tau$  en función de  $dv/dr$  no es lineal a

través del origen. Los fluidos no newtonianos pueden dividirse en dos categorías principales, en base a su comportamiento de esfuerzo cortante / velocidad de corte: fluidos en los que el esfuerzo cortante es independiente del tiempo o duración de la acción cortante (independientes del tiempo) y aquellos en los que el esfuerzo cortante depende del tiempo o duración de la acción cortante (dependientes del tiempo). Además de su comportamiento anormal en la relación de esfuerzo cortante, algunos fluidos no newtonianos también tienen características elásticas (como el caucho por ejemplo), que son una unción del tiempo y que por ello se les llama viscoelásticos. Estos fluidos exhiben esfuerzos normales perpendiculares a la dirección del flujo, además de los esfuerzos tangenciales usuales.

El comportamiento gráfico de los diferentes tipos de fluidos estudiados se muestran en la Figura 1.32.

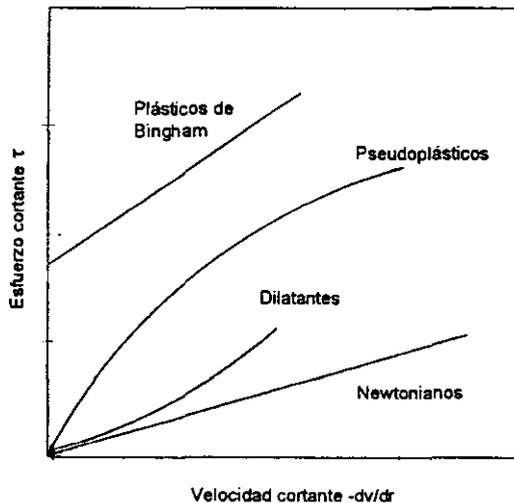


Figura 1.32. Reograma general de fluidos.  
(Geankoplis, 1993).

*Fluidos plásticos de Bingham.* Estos fluidos son los más simples debido a que, tal como se muestra en la gráfica N, solo difieren de los newtonianos a que la relación lineal no pasa por el origen. Para iniciar el flujo se requiere de un exceso de cierto valor del esfuerzo cortante  $\tau_0$  (llamado límite de fluidez) en  $\text{N/m}^2$ .

*Fluidos pseudoplásticos.* La mayoría de los fluidos no newtonianos pertenecen a este tipo. La ecuación que representa este tipo de fluidos es del tipo exponencial a la que se llama ley de la potencia de Ostwald-de Waele,

$$\tau = K \left( \frac{dv}{dy} \right)^n \quad (1.30)$$

donde K es el índice de consistencia en  $\text{N s}^n/\text{m}^2$ , y n es el índice de flujo, cantidad adimensional. La viscosidad aparente disminuye al aumentar el esfuerzo cortante.

*Fluidos dilatantes:* Estos son mucho menos comunes que los pseudoplásticos y su comportamiento muestra un aumento de la viscosidad aparente al aumentar la velocidad de corte; se aplica la ley de la potencia con la restricción de  $n > 1$ .

Algunas investigaciones llevadas a cabo sobre los fundamentos de transferencia de cantidad de momento y reología, han conducido a la definición de otros modelos, en los cuales se ven implicados parámetros adicionales a los ya mencionados. Bird, et al (1987), menciona a dos tipos de fluidos no newtonianos

- a) Fluidos que cumplen con el modelo de Carreau-Yasuda.
- b) Fluidos que cumplen con el modelo de la ley de la potencia.

Como ya se mencionó, los fluidos de la ley de la potencia, son los definidos como dilatantes y los pseudoplásticos; en los primeros los parámetros a considerar, son adicionalmente  $\eta_0$ , que corresponde a la viscosidad en esfuerzo cortante nulo,  $\eta_\infty$  corresponde a la viscosidad con esfuerzo cortante infinito,  $\lambda$  es un tiempo constante, a es un parámetro adimensional, que describe la transición entre el esfuerzo cortante nulo y la región de la ley de la potencia.

De este modelo se desprenden a su vez algunos otros aplicables a fluidos en particular.

- Modelo de Spriggs:  $\eta = \eta_0 \left[ \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right]^{n-1}$

-Modelo de Eyring:  $\eta = \lambda \tau_0 \left( \frac{\arcsen \lambda \dot{\gamma}}{\lambda \dot{\gamma}} \right)^\alpha + \eta$

-Modelo de Ellis:  $\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + \left( \frac{\tau}{\tau_{1/2}} \right)^{\alpha-1}$

-Modelo de Bingham:  $\eta = \mu_0 + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}$

Es importante mencionar, que estos modelos deben de cumplir, además, con ciertas restricciones adicionales, que son diferentes para cada modelo.

### 1.4.3. REGIMENES DE FLUJO

Con diversos estudios se ha demostrado que la transición del flujo laminar al turbulento no es solo función de la velocidad, sino también de la densidad y la viscosidad del fluido y del diámetro del tubo, cuando se esta manejando flujo a través de tuberías. Estas variables se combinan en la expresión del número de Reynolds que es adimensional:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (1.31)$$

para el caso newtoniano, cuando el fluido en cuestión es del tipo no newtoniano, el número de Reynolds es:

$$Re = \frac{D^n V^{2-n} \rho}{K b^{n-1}} \quad (1.32)$$

en donde  $b^{n-1}$ , es la velocidad de corte  $\dot{\gamma}$ .

La inestabilidad del flujo que conduce a un régimen perturbado o turbulento está determinado por la relación de las fuerzas de inercia o cinéticas y las fuerzas viscosas de la corriente del flujo.

Cuando el número de Reynolds es menor a 2100 para una tubería circular recta, el flujo siempre es laminar. Cuando el valor es superior a 4000, el flujo será turbulento. Entre estos dos valores o región de transición. El flujo puede ser laminar o turbulento, dependiendo de las características del sistema, que resultan difíciles de predecir.

Cuando el fluido no es impulsado a través de una tubería sino que se mueve por la acción de la velocidad de giro de un agitador, en un recipiente, las características de relación de fuerzas cambian.

Puesto que la potencia requerida para un sistema dado no puede predecirse teóricamente, se tienen correlaciones empíricas para estimar los requerimientos de potencia. La presencia o ausencia de turbulencia puede correlacionarse con el número de Reynolds del agitador, que se define como:

$$Re_i = \frac{D^2 N \rho}{\mu} \quad (1.33)$$

Donde  $d$  es el diámetro del impulsor en m,  $N$  es la velocidad de rotación del agitador en rps.

El flujo es laminar en el tanque cuando  $Re_i > 10$ , turbulento cuando  $Re_i > 10000$ , para el intervalo de 10 a 10 000, el flujo es transitorio, mostrándose turbulento en las cercanías del impulsor y laminar en las cercanías de la pared del tanque.

Para el caso de fluidos no newtonianos en un sistema de mezclado, se han desarrollado correlaciones que auxilian en el caso del cálculo del número de Reynolds.

Metzner y Otto (1957), desarrollaron el concepto de  $K_s$ , con la finalidad de poder conocer el valor de la velocidad de corte y de otra forma el número de

Reynolds. Sin embargo, una alternativa diferente a esta metodología, es analogar la velocidad de agitación con la velocidad de corte.

Realizando estudios sobre patrones de flujo en anclas, Peter y Smith (1969), desarrollaron la siguiente ecuación para el cálculo del número de Reynolds:

$$Re_c = \frac{N^{2-n} d^2 \rho}{K[a(1-n)]^{n-1}} \quad (1.34)$$

en donde (a) es un factor geométrico relacionado con la velocidad de corte, calculado como:

$$a = 37 - 120 \left( \frac{c}{D} \right) \quad (1.35)$$

Trabajando con impulsores helicoidales y flujo laminar, Rieger y Novak(1973), desarrollaron la siguiente ecuación para el cálculo del número de Reynolds:

$$Re_c = \frac{N^{2-n} d^2 \rho}{K} \quad (1.36)$$

Otros tratamientos se han desarrollado empleando los conceptos clásicos de  $K_s$  y  $K_p$ , relacionados con los parámetros no newtonianos. El cálculo final depende tanto de la finalidad del estudio como de las características del sistema de mezclado.

## 1.5. DISCUSIÓN SOBRE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Las investigaciones llevadas al cabo, han abordado los aspectos mas comunes sobre las operaciones de mezclado, como se mostró en la revisión bibliográfica presentada.

Muchos de estos estudios, se han abocado a la obtención de correlaciones matemáticas que expliquen ciertos comportamientos propios de agitadores en particular y en otros casos en forma comparativa, en todos los trabajos estudiados se ha trabajado con fluidos modelo.

El hecho de que para ciertos tipos de industrias el uso de tipos específicos de agitadores sea de mayor interés explica en parte el porque la mayoría de los estudios revisados se hayan hecho para este tipo de agitadores "clásicos". Sin embargo, no debemos soslayar el hecho de que las geometrías menos estudiadas representan muchas veces una mayor complejidad.

Mas marcado es el hecho de que el estudio de los fenómenos que se verifican en las operaciones de agitación se haya desarrollado para fluidos newtonianos, si consideramos que en la mayoría de las industrias, incluyendo la química, se utilizan fluidos no newtonianos, que a semejanza de las geometrías de impulsores no clásicos, se comportan de manera compleja y su manejo implica un mayor control tanto en la misma operación como en los métodos de estudio y de cálculo de sus propiedades. Aunque no debemos olvidar que los primeros estudios llevados acabo sobre agitación los tomaron en cuenta (Metzner y otto ,1957).

Las tendencias actuales en las investigaciones han a utilizado ampliamente en sus métodos, el uso de sistemas de cómputo, así se han desarrollado paralelamente a los resultados experimentales *in vitro*, sistemas que simulan la operación y que obtienen resultados que ayudan a comprender desde otra óptica la operación en estudio. En otros casos, la simulación concuerda con los resultados experimentales y se utiliza como apoyo en la obtención de conclusiones.

Pudo observarse que la evolución de las técnicas de estudio, ha sido muy importante, tanto para la obtención de datos más precisos, como para facilitar el trabajo experimental, considerando las últimas aportaciones de la computación.

Las correlaciones matemáticas que se revisaron para el caso del estudio de consumo de potencia, se resumen en elegir la estrategia que mas se apege a las semejanzas entre las características del estudio que se vaya a hacer y los que se han hecho.

Finalmente, de las estrategias experimentales planteadas por los estudios surgen consideraciones a tomarse en cuenta en los experimentos a desarrollarse, como son el hecho de la utilización de simulación numérica, el uso de cámaras giratorias, y mas importante aun, la utilización de las técnicas numéricas para la obtención de los resultados que se buscan.

## **2. OBJETIVOS**

---

### **OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el efecto de la pseudoplasticidad sobre la transferencia de calor en un tanque agitado, con impulsor múltiple de turbina y cinta helicoidal.

### **OBJETIVO PARTICULAR 1**

Determinar la importancia del tiempo de estado transiente en el sistema de mezclado propuesto, evaluando las variaciones de temperatura con respecto al tiempo, durante el proceso.

### **OBJETIVO PARTICULAR 2**

Determinar el efecto de los parámetros reológicos sobre el consumo de potencia en el sistema de mezclado propuesto, obteniendo las diferentes curvas de potencia para diferentes niveles de variación en la concentración de soluciones a mezclar.

### **OBJETIVO PARTICULAR 3**

Determinar el efecto de los parámetros reológicos en la velocidad de transferencia de calor que se realiza en el sistema, Evaluando los termogramas correspondientes de los fluidos obtenidos, para cada nivel de variación.

### **OBJETIVO PARTICULAR 4**

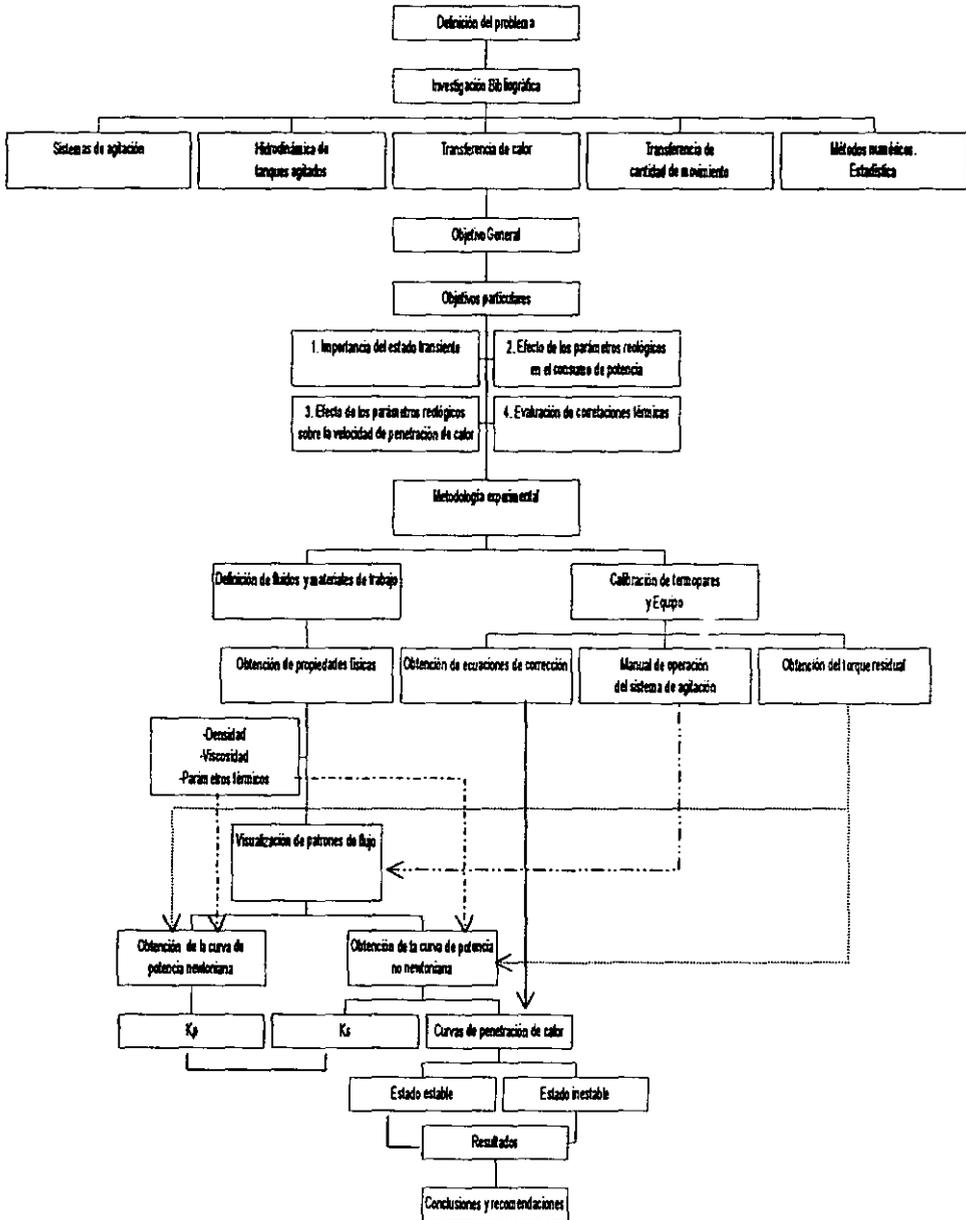
Determinar las correlaciones térmicas del sistema de mezclado, tales que permitan conocer los coeficientes convectivos de transferencia de calor, analizando los resultados de las curvas de las potencia y del comportamiento térmico.

## **HIPOTESIS**

A medida que aumente la viscosidad aparente del fluido a mezclar, el tiempo en que el sistema alcance el estado estacionario, será mayor, y de igual forma aumentara el consumo de potencia.

### 3. DESARROLLO

#### 3.1. CUADRO METODOLOGICO



## 3.2. PLAN GENERAL DE TRABAJO

1. Fijar los parámetros reológicos del medio a utilizar; los niveles de variación que se tendrán en los parámetros pseudoplásticos "k" y "n".
2. Establecer las condiciones del medio a utilizar como modelo de mezclado, es decir, si se utilizará una goma, el tipo de esta, las condiciones de dispersión, la concentración a utilizar, etc.
- 3.- Llevar acabo una observación preliminar del sistema. Que permita comprender cualitativamente la operación del mismo.
- 4.- Desarrollar el manual de operación del mezclador y de los equipos empleados adicionalmente a este como controles, registradores, etc.
- 5.- Validar el equipo, es decir, observar la exactitud, linealidad y repetibilidad que se tiene en las condiciones de operación, como pueden ser: velocidad, torque, etc. por lo cual se desarrollará un estudio estadístico para observar si existen variaciones importantes a considerar.
- 6.- Desarrollar un medio a utilizar para visualizar el patrón de flujo que se tiene en el sistema, este medio es el llamado trazador. Y observar los patrones de flujo que se tienen en el sistema.
- 7.- Establecer la metodología a seguir para conocer parámetros tales como el consumo de potencia que se tendrá en el sistema; esto puede desarrollarse empleando modelos matemáticos ya conocidos, en base a resultados obtenidos directamente del equipo o de su operación.
- 8.- Fijar las condiciones a manejar dentro de los experimentos planteados, como son: Temperatura inicial, temperatura final, Tiempo de operación, etc.

9.- Obtener el centro térmico del sistema, o en base a la caracterización hidrodinámica realizada, los puntos de interés térmicos del sistema, que serían analogía del centro térmico, en caso de no existir éste. Para poder desarrollar este punto se debe de considerar algunas actividades preliminares:

9.1.- Establecer los tipos de medidores de temperatura, velocidad, torque, a utilizar en el estudio.

9.2.- Llevar acabo la validación de los instrumentos citados en el punto anterior.

9.3.- Establecer la metodología experimental necesaria para poder encontrar el centro térmico del sistema de estudio o los puntos térmicos de interés en el mismo, (utilización de métodos matemáticos como diferencias finitas).

10.- Establecer las hipótesis de trabajo que se manejaran dentro del desarrollo experimental a plantearse; hipótesis, que surgirán de la inicial (anteriormente planteada), y de los experimentos y actividades desarrolladas con posterioridad.

11.- Proponer los experimentos necesarios para poder contrastar las hipótesis planteadas como de trabajo.

12.- Basándose en las hipótesis planteadas, establecer las variables a controlar (independientes), las variables dependientes, las variables de respuesta; así como los niveles de variación a emplear, el número de repeticiones que se llevaran acabo, y proponer los métodos estadísticos a emplear para tratar los datos así obtenidos.

13.- Llevar acabo los experimentos necesarios que nos permitan conocer el tiempo necesario para que el centro térmico del sistema, alcance el estado

estacionario (cuando las variaciones de temperatura no cambien con el tiempo), es decir obtener los termogramas correspondientes, para los diferentes niveles de parámetros reológicos propuestos.

14.- Analizar los resultados que se obtengan de los experimentos; consiste en general en:

14.1.- En función al tiempo total de proceso o a condiciones del mismo, establecer la importancia del tiempo en que el sistema tarda en llegar al estado estable.

14.2.- Analizar los termogramas con respecto a los patrones de flujo previamente obtenidos

14.3.- Obtener los valores estadísticos de las variables de respuesta, aunado al análisis estadístico que informe sobre variaciones importantes (análisis de varianza, etc.).

14.4.- A partir de las variables de respuesta, someterla a los tratamientos matemáticos pertinentes (linealización, linealización múltiple, análisis adimensional, etc.), que permitan obtener correlaciones matemáticas sobre los parámetros térmicos e hidrodinámicos de interés.

15.- Obtener conclusiones sobre los resultados obtenidos; en su caso, replantear hipótesis y confrontarlas con los nuevos experimentos.

### 3.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

#### *Actividad experimental 1. Calibración de termopares.*

Variables:

- Variable independiente: Tiempo
- Variable dependiente: Temperatura
- Variable de respuesta: Ecuación de corrección.
- Niveles de variación: Calentamiento de agua de temperatura ambiente (25°C), a ebullición (92°C).
- Número de eventos: 3 por cada termopar a utilizar.
- Tratamientos estadísticos: Linealidad (Regresión lineal)
  - Exactitud (Desviación estándar, Coeficiente de variación)
  - Repetibilidad (Análisis de varianza)

#### *Actividad 2. Caracterización del sistema de agitación.*

Actividad 2.1. Elaboración del manual de operación del sistema de agitación.

Actividad 2.2. Experimental. Validación del sistema de agitación

Variables:

- Variable independiente: Velocidad.
- Variable de respuesta: Torque, torque residual.
- Variable de respuesta: Curva de consumo de potencia.
- Niveles de variación: En función a la viscosidad del medio de mezclado, se mantendrá el Régimen laminar.
- Número de eventos: 3
- Tratamientos estadísticos: Exactitud (Desviación estándar, Coeficiente de variación)
  - Repetibilidad (Análisis de varianza)

#### *Actividad experimental 3. Visualización de los patrones de flujo.*

Actividad 3.1. Desarrollo de los trazadores a utilizarse en la visualización de los patrones de flujo.

Actividad 3.2. Realizar la visualización de los patrones de flujo, según se describe en el anexo 4.

*Actividad experimental 4. Obtención de la curva de potencia newtoniana.*

Actividad 4.1. Obtener los parámetros físicos de el/los fluidos newtonianos a utilizarse. (Densidad y viscosidad).

Actividad 4.2. Obtener la curva de potencia según se explica en el anexo 1.

Variables:

Variable independiente: Velocidad

Variable dependiente: Torque.

Variables de respuesta: Curva de consumo de potencia; Kp.

Niveles de variación: Velocidades de 10 a 180 RPM.

Número de eventos: 3 por cada fluido de trabajo (Glicerol 90%.  
Glicerol 100%. Glucosa 85%. Glucosa 90%).

Tratamientos estadísticos: Exactitud (Desviación estándar, Coeficiente de variación)

Repetibilidad (Análisis de varianza).

Para esta actividad, las pruebas serán por repetición, pues se considera que las propiedades reológicas de los fluidos no se ven afectadas por el tratamiento experimental.

*Actividad experimental 5. Obtención de las curvas de potencia no newtonianas.*

Actividad 5.1. Obtener los parámetros físicos de el/los fluidos no newtonianos a utilizarse. (Densidad y viscosidad).

Actividad 5.2. Obtener la curva de potencia según se explica en el anexo 1.

Variables:

Variable independiente: Velocidad

Variable dependiente:	Torque.
Variables de respuesta:	Curva de consumo de potencia; Kp.
Niveles de variación:	Velocidades de 10 a 180 RPM.
Número de eventos:	3 por cada fluido de trabajo (Soluciones de xantana de 0.5 %, 1%, 1.5 %, 2.0%, 2.5%).
Tratamientos estadísticos:	Exactitud (Desviación estándar, Coeficiente de variación) Repetibilidad (Análisis de varianza).

Para esta actividad, las pruebas serán por repetición, pues se considera que las propiedades reológicas de los fluidos no se ven afectadas por el tratamiento experimental.

*Actividad experimental 6. Obtención de las curvas de penetración de calor para fluidos newtonianos.*

Actividad 6.1. Fijar las condiciones de operación. Temperaturas iniciales, Temperaturas finales. Tiempo de proceso, etc.

Actividad 6.2. Desarrollar el manual de operación del sistema de agitación/calentamiento.

Actividad 6.3. Desarrollar los fluidos de trabajo.

Actividad 6.4. Obtener los termogramas correspondientes para los fluidos de trabajo (Glicerol, Glucosa):

Variables:

Variable independiente:	Velocidad
Variable dependiente:	Temperatura, Torque.
Variable de respuesta:	Curva de penetración de calor. Coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido de trabajo.
Niveles de variación:	Obtención de curvas de penetración de calor

para cada uno de los niveles de variación de velocidad del experimento de obtención de curvas de potencia (10 niveles).

Número de eventos: 3 por cada velocidad.

Tratamientos estadísticos: Exactitud (Desviación estándar, Coeficiente de variación)

repetibilidad (Coeficiente de variación, desviación estándar).

Repetibilidad (Análisis de varianza).

Para esta actividad se realizará un análisis reológico de los fluidos empleados, para verificar si existe algún cambio en los parámetros, y en su caso realizar la experimentación por replica o por repetición.

*Actividad experimental 7. Obtención de las curvas de penetración de calor para fluidos no newtonianos.*

Actividad 7.1. Fijar las condiciones de operación. Temperaturas iniciales, Temperaturas finales. Tiempo de proceso, etc.

Actividad 7.2. Desarrollar los fluidos de trabajo.

Actividad 7.3. Obtención de la viscosidad de proceso, en función a la curva de potencia no newtoniana obtenida en la actividad 5.

Actividad 7.4. Obtener los termogramas correspondientes para los fluidos de trabajo (Soluciones de xantana):

Variables:

Variable independiente: Velocidad

Variable dependiente: Temperatura, Torque.

Variable de respuesta: Curva de penetración de calor. Coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido de trabajo.

Niveles de variación: Obtención de curvas de penetración de calor para cada uno de los niveles de variación de velocidad que resulten del cálculo de la

viscosidad de proceso, manteniendo el régimen laminar (10 niveles).

Número de eventos: 3 por cada velocidad.

Tratamientos estadísticos: Exactitud, (Desviación estándar, Coeficiente de variación)

repetibilidad (Coeficiente de variación, desviación estándar).

Repetibilidad (Análisis de varianza).

Para esta actividad se realizará un análisis reológico de los fluidos empleados, para verificar si existe algún cambio en los parámetros, y en su caso realizar la experimentación por replica o por repetición.

### 3.4. MATERIALES

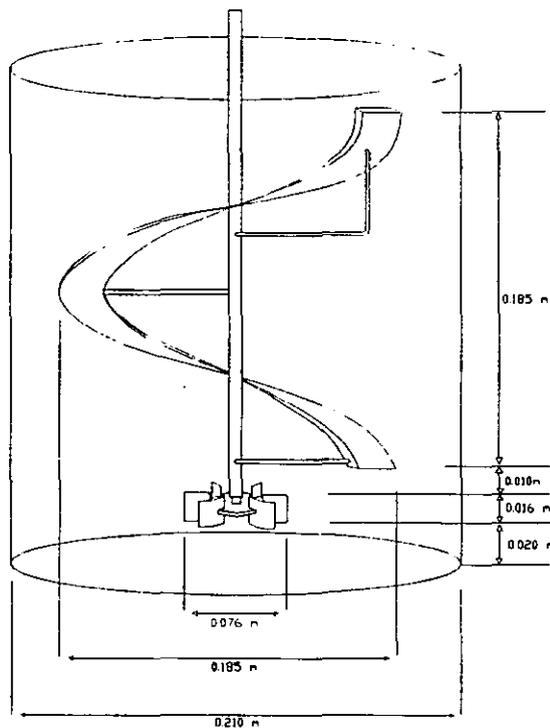
La investigación que se llevará a cabo, será desarrollada durante el proceso de mezclado de un fluido pseudoplástico en un tanque con agitación, el cual tiene un sistema de calentamiento-enfriamiento adicional.

El tanque que se plantea utilizar para la investigación, es un recipiente cilíndrico de acero inoxidable 304, BWG 10, de 1/8 in de espesor, con una altura de 40 cm, 21 cm de diámetro interno, la capacidad total es de 13.5 litros. El tanque mantiene como equipo auxiliar una chaqueta exterior ya sea para llevar a cabo calentamiento o enfriamiento del fluido interno del tanque.

El diseño de la tapa permite introducir sensores al interior del tanque, para ello la tapa es removible y horadada en dirección radial. La tapa mencionada es de acero y se acopla al tanque mediante un sistema de atomillamiento; el rodamiento es un sistema mecánico que permite introducir la flecha del impulsor y mantener una velocidad diferente entre dos tipos de impulsores que se trabajan. El tipo de impulsor a utilizarse es compuesto, consistiendo de una hélice de un ciclo y una turbina Rushton, siendo este tipo de impulsor un sistema dual.

El medio de propulsión para el agitador es un motor de corriente directa a 180 V, y que permite obtener una velocidad máxima de 1750 r.p.m., de Marca Emerson Co. El modelo de este equipo es 3120-416. Adicional a este motor se encuentra un variador de voltaje o control de velocidad, de marca y modelo Electrol 2000.

La geometría del agitador se muestra en la Figura 3.1. y según las recomendaciones se manejará una relación  $H/d=1.2$



*Figura. 3.1. Proporciones geométricas del sistema experimental*

Para realizar la operación de transferencia de calor en el sistema de agitación se cuentan con algunos sistemas de calentamiento, tales como un baño térmico Brookfield, que puede manejar un caudal de 1.6 L/s; así como dos baños de temperatura construidos ex profeso en el laboratorio de alimentos (posgrado), en colaboración con el centro de instrumentos UNAM.

Se utilizarán para el estudio de los efectos de la transferencia de calor termopares de marca Omega y del tipo K, constantan-cobre, La interfase mediante la cual las lecturas obtenidas con dichos termopares podrán ser capturadas es un banco de datos ECO, Serie 5000, Modelo 5100 de Logger Lab.

El software para llevar cabo la captura de los datos térmicos es de Electronic controls, design (Metashel), modelo 5000.

Adicionalmente se utilizaran otros equipos, que permitirán obtener parámetros de importancia para el estudio que se llevará a cabo; entre otros se utilizara un reómetro marca Haake, tipo CV-20N; densímetros Robsan QD R028 y QD R029, con rangos de medición de densidad de 1.000 a 1.400 gr/ml, Calorímetro diferencial de barrido, etc.

### 3.4.1 FLUIDOS DE TRABAJO

De acuerdo con los planteamientos del proyecto se pretende establecer la relación que existe entre las propiedades reológicas de los fluidos y la transferencia de calor que se efectúa en un tanque agitado; para este efecto se pretende utilizar fluidos newtonianos y no newtonianos, en particular en este último tipo, los que cumplen con la ley de la potencia o pseudoplásticos.

Los fluidos newtonianos que se utilizaran, se seleccionaron principalmente debido a su alta viscosidad. En este caso, se utilizó Glicerol al 90 y 100%, y soluciones de glucosa al 96 y 97%.

Los fluidos no newtonianos que se emplearán son soluciones de goma xantana (Keltrol-T), en concentraciones máximas de 5 %. Para la preparación de dichas soluciones se utilizó adicionalmente 100 ppm de  $\text{NaN}_3$  como agente bactericida.

La caracterización reológica de las soluciones tanto newtonianas como no newtonianas, se efectuará en un reómetro Haake CV-20N, utilizando la geometría de tipo cono y plato. Dicho equipo permite un intervalo de velocidad de corte de 0.3 a 300  $\text{s}^{-1}$ , pudiendo evaluar viscosidades entre 0.020 y 10 000 Pa s, adicionalmente el equipo cuenta con un sistema de computo capaz de realizar la adquisición de los datos obtenidos de las pruebas, e incluso dar la respuesta reológica de la forma de la ecuación a la que más se aproxime.

### 3.5. METODOS

Los métodos del trabajo experimental, se basan en someter a un medio fluido de características definidas, a agitación dentro de un tanque, con un impulsor de características también definidas.

En cuanto a las pruebas a realizarse para evaluar la transferencia de calor en el tanque, se someterán las muestras a agitación por medio del impulsor dual, registrándose los datos de temperatura en diversas regiones según los estudios de perfiles de temperatura y patrones de flujo que se obtengan. Dichas mediciones a su vez serán utilizadas en conjunción con los valores de potencia y/o torque obtenidos para obtener las correlaciones de interés.

Las evaluaciones de los parámetros reológicos a utilizarse, se llevaran acabo en un reómetro, en prueba de cizalla rotacional simple.

Los cálculos del número de Reynolds con relación al del régimen laminar, indicaran los intervalos de velocidad a manejar.

Para realizar los cálculos de consumo de potencia es necesario realizar la relación de torque y velocidad rotacional siguiente:

$$P = 2\pi N(T-T_0) \quad (1.37)$$

En donde  $T_0$ , es el parámetro conocido como torque residual, y que corresponde al torque sin fluido debido al rodamiento del sistema en la tapa y también debido al propio impulsor.

### 3.5.1. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEADES TÉRMICAS

La evaluación de las propiedades térmicas de los fluidos a emplear, como la conductividad térmica, la capacidad calorífica y la difusividad térmica, podrán llevarse a cabo, mediante dos métodos, pudiendo con ello tener una mayor precisión en las respuestas obtenidos y en los resultados finales que empleen estos parámetros.

Existen las correlaciones matemáticas desarrolladas a partir de datos experimentales para casos específicos de sustancias o generales empleando sus características de composición. Por otro lado se puede realizar el ensayo experimental utilizando el equipo Calorímetro diferencial de barrido que da una respuesta real para la muestra en cuestión. Desde luego la última opción es la más adecuada, sin embargo, como ya se mencionó se pretende realizar una comparación entre ambos métodos.

De las correlaciones existentes para la evaluación de la conductividad térmica, se utilizará la ecuación propuesta por Riedel (1949), la cual es función de la temperatura y el contenido de humedad de la muestra:

$$K = (326.547 + 1.0412 T - 0.0033T^2)(0.796+0.009346\%X) \times 10^{-3} \quad (1.38)$$

En donde %X es el contenido de humedad de la muestra,  $K = W/m^{\circ}C$  y  $C=^{\circ}C$

Es de notar que para algunos tipos de fluidos, la literatura reporta los resultados experimentales de algunos parámetros térmicos, como en el caso del glicerol, (Perry y Chilton, 1989).

Leninger y Beverloo (1975), propusieron una correlación matemática para el cálculo de la capacidad calorífica:

$$C_p = 4.190X_w + [(1.370+0.0113*T)(1-X_w)] \quad (1.39)$$

En donde  $X_w$  es la fracción de humedad de la muestra,  $T=^{\circ}C$  y  $C_p=cal/g^{\circ}C$

### **3.5.2. MEDICIÓN DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA**

Una de los puntos clave del proyecto, es la forma en la cual se evaluarán los perfiles de temperatura que se dan cuando se esta llevando acabo calentamiento en el tanque de agitación. Para tal efecto se utilizarán 5 sensores de temperatura (termopares), del tipo k (Omega), y un sistema de adquisición de datos ECO, Serie 5000.

La ubicación de los diferentes sensores seleccionados en el tanque está en función al diseño del tanque. Figura 3.2. De acuerdo con los lineamientos del proyecto, se pretende verificar la transferencia en los ejes axial y radial; para este efecto, la colocación fue la que lo permitía, tal como se muestra en el siguiente diagrama:

### **3.5.3. MEDICIÓN DE TORQUE Y VELOCIDAD DE AGITACIÓN**

Para llevar cabo la medición del torque, se utilizará un torquímetro marca S. Himmelstein & Co., modelo 2801T (25-0), el cual va acoplado a la flecha que sale del motor y propulsa al agitador. La señal de salida del torquímetro es amplificada por una unidad modular 6-201 y un amplificador 66032, también de la marca Himmelstein & Co.

La velocidad del agitador se evaluó mediante el uso de un tacómetro digital de haz de luz de marca, Fisher Scientific, modelo L 497791.

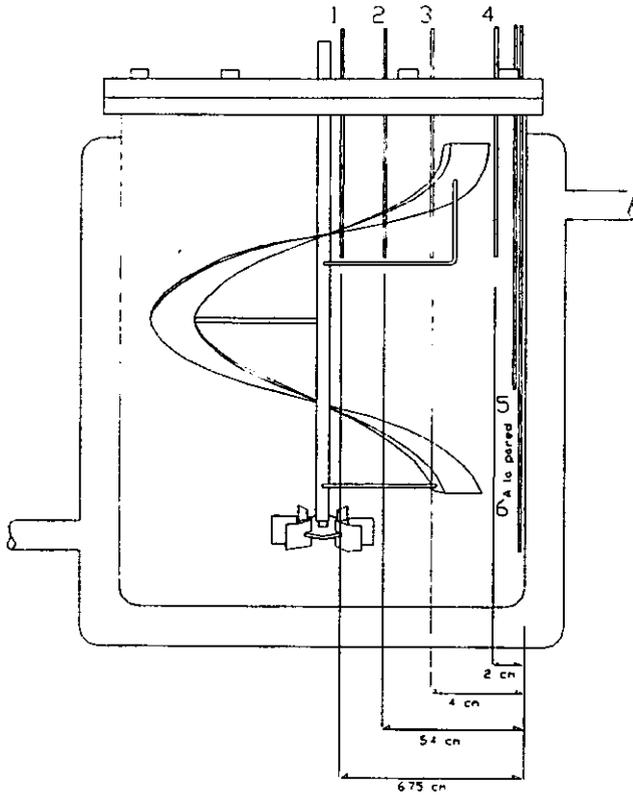


Figura 3.2. Colocación de los sensores de temperatura.

#### **3.5.4. EVALUACIÓN DE LOS PATRONES DE FLUJO**

Para llevar cabo la evaluación de los patrones de flujo se utilizo una técnica de reacción química colorimétrica acoplada a un sistema de videograbación. La técnica descrita por Lamberto et al. (1995), empleada originalmente para la medición de tiempos de mezclado, se utilizó en este caso, el desarrollo se muestra en el anexo 4.

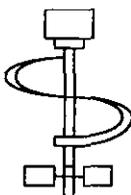
## 4. AVANCES DE LA INVESTIGACIÓN

---

Como ya se mencionó el trabajo que se está presentando, forma parte del proyecto de seminario de la maestría en ciencias de alimentos. La investigación, tal como se ha propuesto en los objetivos, finaliza en la obtención de correlaciones de los aspectos térmicos del sistema propuesto. Los resultados que se han obtenido a la fecha son de importancia, pero desde luego representan una pequeña parte del proyecto global.

A continuación se hace una descripción de dichos resultados obtenidos o avances de la investigación.

1. Se delimitó el tipo de impulsor a emplear, así como el sistema de mezclado. Para este caso, de acuerdo con las investigaciones anteriores del laboratorio de ingeniería de alimentos, a los resultados obtenidos de dichas investigaciones y la revisión bibliográfica, se propuso emplear un agitador dual: Turbina Rushton - Cinta helicoidal. Dicho tipo de impulsor presenta ciertas características de diseño, que lo hacen ideal para procesos de biotecnología entre otros, pues realiza en un mismo proceso las operaciones de dispersión y de homogeneización. Además se eligió un sistema de mezclado en tanque, el cual estará enchaquetado para poder llevar a cabo en el los proceso de calentamiento-enfriamiento, bajo los cuales gira el proyecto propuesto, es decir realizar la operación de mezclado, bajo un calentamiento y/o enfriamiento y ver cual es el efecto resultante.



*Fig. 4.1. Impulsor Dual Turbina-Cinta helicoidal*

2. Se propusieron los medios a utilizar como fluidos modelo, dentro de la experimentación. Dichos fluidos se consideraron tanto para la validación del sistema de agitación (fluidos newtonianos), como para la parte experimental del proyecto (fluidos no newtonianos); dichos fluidos fueron:

- Glicerol 90 %
- Glicerol 100%.

Ambos se utilizaron para la evaluación de la curva de potencia de fluidos newtonianos a obtener en el sistema de agitación, además de la visualización del patrón de flujo existente en el tanque agitado.

- Glucosa 70 %
- Glucosa 80 %.

Ambos se utilizaron para la evaluación de la curva de potencia de fluidos newtonianos a obtener en el sistema de agitación.

- Soluciones de Xantana (0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0).

Las cuales se emplearán en los experimentos a realizarse sobre la transferencia de calor en el sistema de agitación.

3. Se obtuvieron experimentalmente los parámetros físicos a emplearse en los cálculos hidrodinámicos del sistema; dichos parámetros fueron la densidad y la viscosidad, a emplearse básicamente en el calculo del numero de potencia y del numero de Reynolds. Los resultados experimentales se presentan en las gráficas, (Figuras 4.2. y 4.3.), Los parámetros en las tabla 4.1. y 4.2.

*Tabla 4.1. Propiedades físicas de fluidos de trabajo*

	Glicerol 90 %	Glicerol 100%	Glucosa 85%	Glucosa 90 %
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1.236	1.259	1.381	1.47
Viscosidad (Pa/s)	0.1305	0.6939	18.623	35.63

Tabla 4.2. Parámetros reológicos de soluciones de xantana.

Concentración	K	n
0.5 %	4.587	0.336
1.0 %	10.625	0.165
1.5 %	12.142	0.142
2.0 5	13.338	0.115

De los resultados presentados, puede observarse que existe una relación directa cualitativamente, conforme aumenta la concentración del soluto de la mezcla, tanto para los fluidos no newtonianos, como en los newtonianos, siendo en este caso más evidente; sin embargo, un análisis de variación nos muestra que el comportamiento, pese a ser proporcional, no cumple con una relación constante. En el caso de los fluidos no newtonianos, cuando la concentración es baja, un aumento implica una elevación sustancial de los parámetros reológicos. La variación decrece conforme aumenta la concentración.

Existen muchas explicaciones que se han dado para justificar este hecho, la más comúnmente aceptada es la teoría de la solvatación o hidratación, en la cual las partículas de soluto (en este caso la goma xantana), se hidratan reteniendo humedad, cuando se añade un exceso de soluto, no existe agua libre y el cambio en los parámetros reológicos ya no es importante.

En el caso de los fluidos newtonianos, se da un comportamiento análogo, sin embargo, es más evidente el cambio de viscosidad cuando existe una variación de concentración.

Además de observar los comportamientos ofrecidos por los diferentes tipos de fluidos, se concluyó que el más adecuado para realizar la gráfica de potencia newtoniana, a utilizarse posteriormente, es la solución de glucosa al 90%, pues presenta una mayor viscosidad, lo cual es importante ya que los niveles de velocidad a manejar pueden ser más amplios y mantener a la vez el régimen laminar.

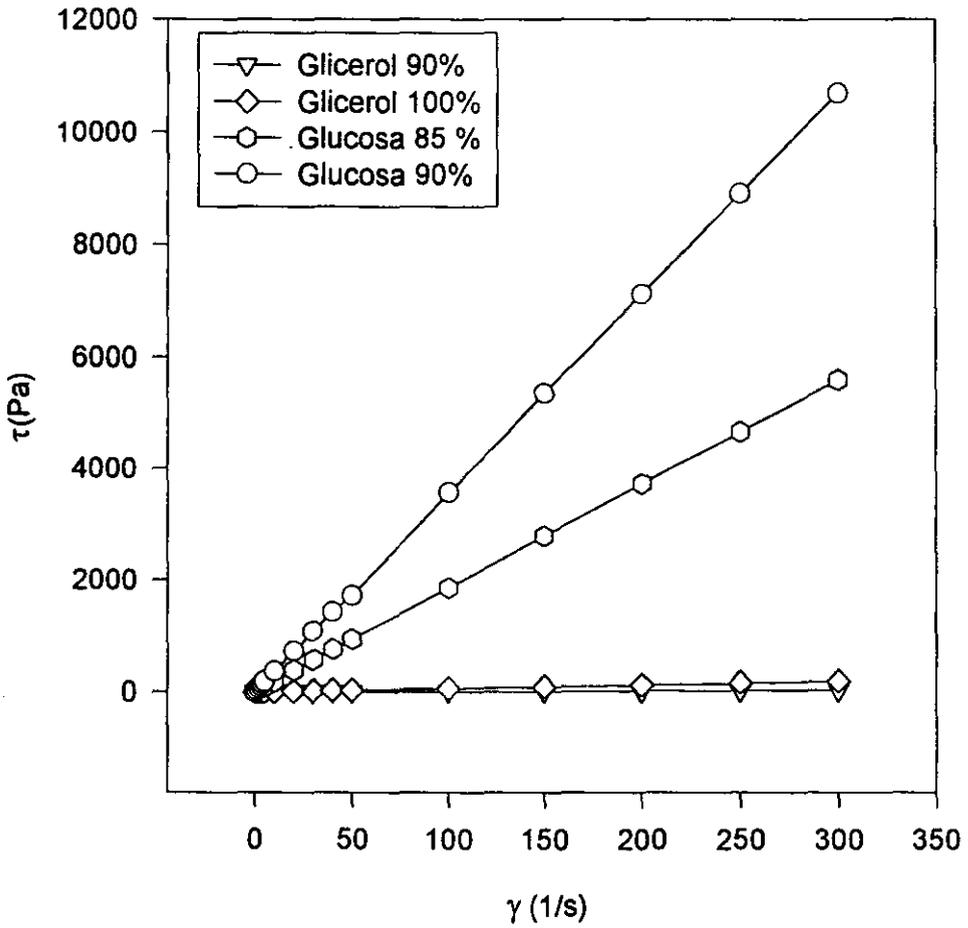


Figura 4.2. Reograma experimental de Fluidos Newtonianos

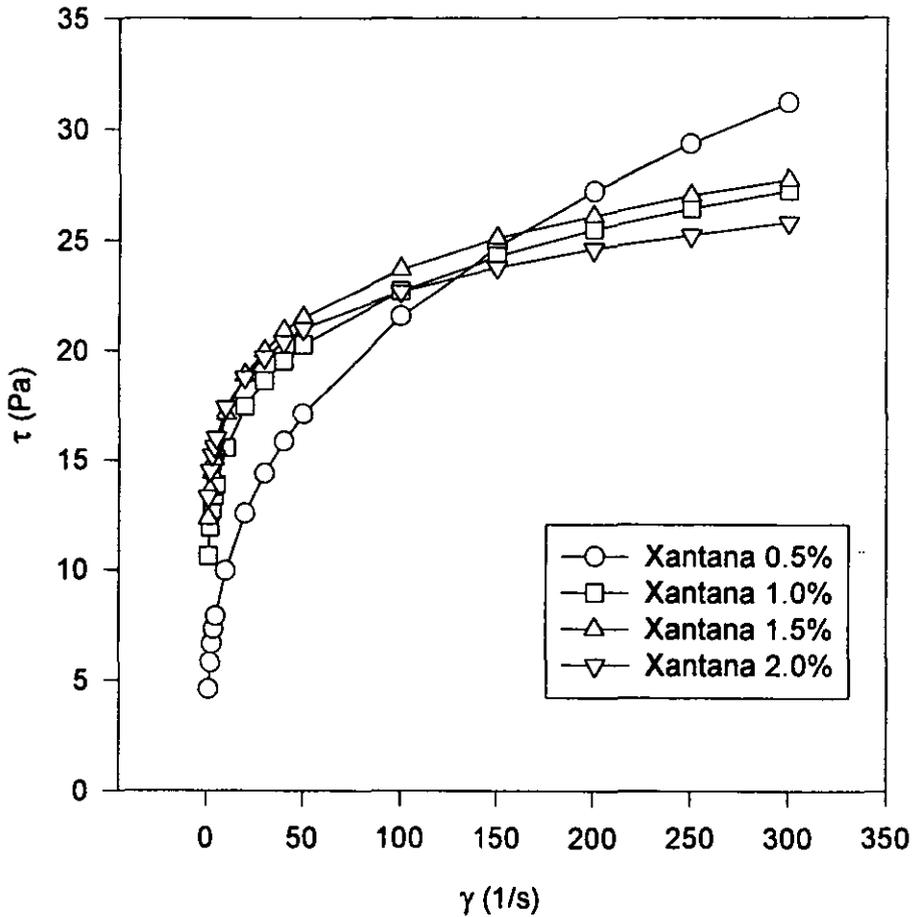


Figura 4.3. Reograma de Fluidos  
No newtonianos

4. Se validaron los instrumentos a utilizar tales como torquímetro, termopares, etc. De dicha validación se desprende que el sistema es confiable en los resultados que de él se obtienen.

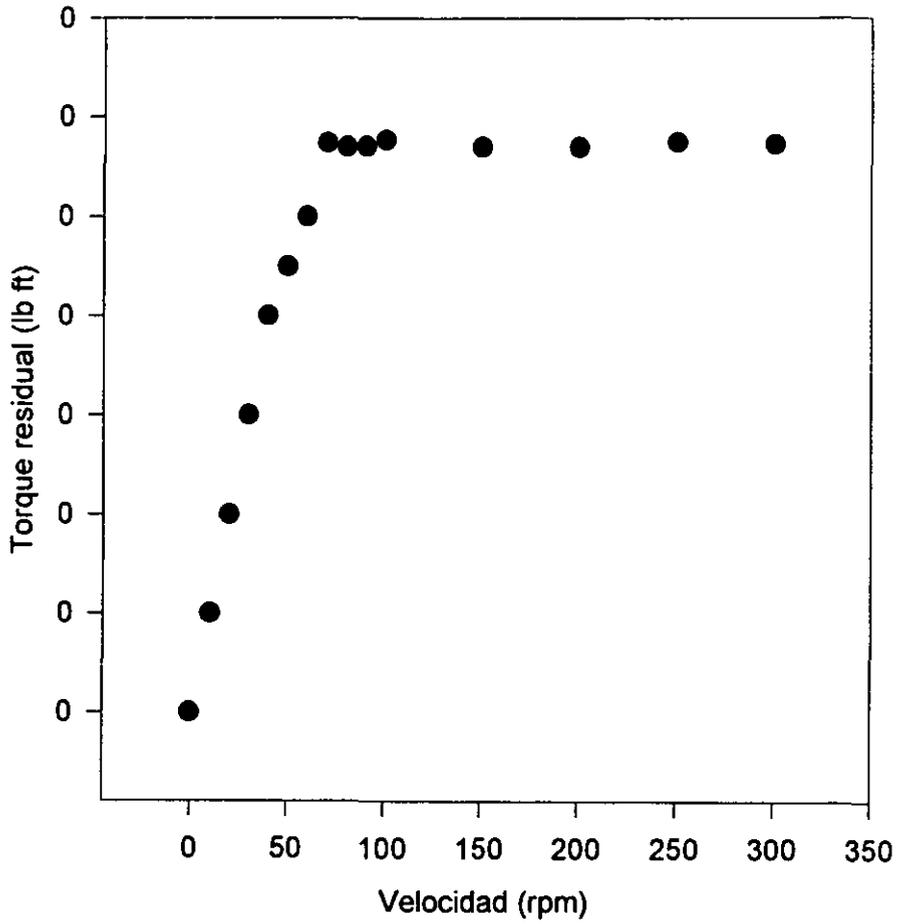
En la tabla de validación de termopares (Tabla 4.3), se observan los datos experimentales obtenidos. Se realizaron pruebas de linealidad manteniendo los termopares en agua en ebullición midiendo la respuesta en condiciones de temperatura constante en este caso la temperatura de ebullición del agua (92°C). Los sensores que se utilizarán, fueron validados realizando pruebas alternas de calentamiento y enfriamiento, en intervalos tanto de tiempo como de temperatura; se realizaron pruebas estadísticas para verificar que cada uno de los termopares diera una respuesta válida en términos estadísticos. Obteniendo valores de desviación estandar y coeficientes de variación muy bajos (menores a 5%). Los resultados de las linealizaciones obtenidas se muestran a continuación:

Tabla 4.3. Validación de termopares

NUMERO DE TERMOPAR	a	b	r <sup>2</sup>
1 (Ω3)	25.10	0.65	0.998
2 (Ω4)	24.86	0.59	0.999
3 (Ω5)	25.63	0.63	0.999
4 (Ω6)	25.90	0.58	0.997
5 (Ω10)	26.01	0.59	0.999
6 (Ω12)	24.56	0.64	0.998
7 (J1)	24.89	0.55	0.999

5. Con posterioridad a la validación del sistema de agitación se procedió al desarrollo del manual de operación del mismo, (Anexo 5)

6. Se determinó experimentalmente el torque residual; este factor es de importancia cuando se esta trabajando a velocidades de agitación bajas, pues la medición del torque resultante es tan baja que el torque residual afecta a la respuesta final.



*Figura 4.4. Evaluación del Torque residual*

Se determinó realizando cambios de velocidad en el sistema de agitación y midiendo el torque resultante con el tanque sin fluido de trabajo, el torque que se lee entonces, es el ejercido por el efecto del rodamiento mecánico del impulsor solamente. Las variaciones de velocidad a que se sometió el sistema fueron de 0 a 100 rpm en intervalos de 20 rpm y de 100 a 800 rpm, en intervalos de 100 rpm. Esta diferencia es debida a que generalmente se trabajará con velocidades máximas cercanas a 100 rpm, por el efecto de mantener el régimen laminar. Los resultados se presentan en la figura 4.8. Como puede observarse, el torque residual mantiene una relación aproximadamente directamente proporcional con la velocidad de agitación, sin embargo, también pudo observarse que el valor máximo de torque residual se alcanza con una velocidad de 70 rpm en adelante, manteniéndose constante posteriormente, incluso a las velocidades máximas del impulsor. Se considero un torque residual medio, pues según los resultados estadísticos obtenidos, el coeficiente de variación es muy bajo (3.9%), lo cual da confiabilidad a los datos obtenidos; de esta forma el valor de torque residual es de 0.57 lb in, lo cual concuerda con otros experimentos realizados, tal como Nuñez (1996), que para un intervalo de 0 a 200 rpm, obtuvo un  $T_0$  de 0.5 lb $\cdot$ in.

7. Se llevó a cabo la experimentación para la obtención de las curvas de potencia para sistemas newtonianos (Glicerol y Glucosa). Se utilizaron este tipo de fluidos, ya que se quería analizar el funcionamiento del equipo, si existía repetibilidad en sus resultados, además de que es de relevancia para el estudio posterior, pues permite obtener el parámetro  $K_p$ , de uso posterior en la evaluación de la viscosidad de proceso para fluidos no newtonianos. Los resultados experimentales se anexan en las figuras 4.5 a 4.8.

Como puede observarse, existe una relación lineal entre los datos de potencia y velocidad de agitación, la cual es mayor para cuando se tienen fluidos de viscosidad mayor, se explica desde luego, considerando que una mayor viscosidad hace un efecto de frenado en las hojas del agitador, por lo cual este debe ejercer un mayor esfuerzo para mantener la velocidad indicada, que es en este caso la variable dependiente.

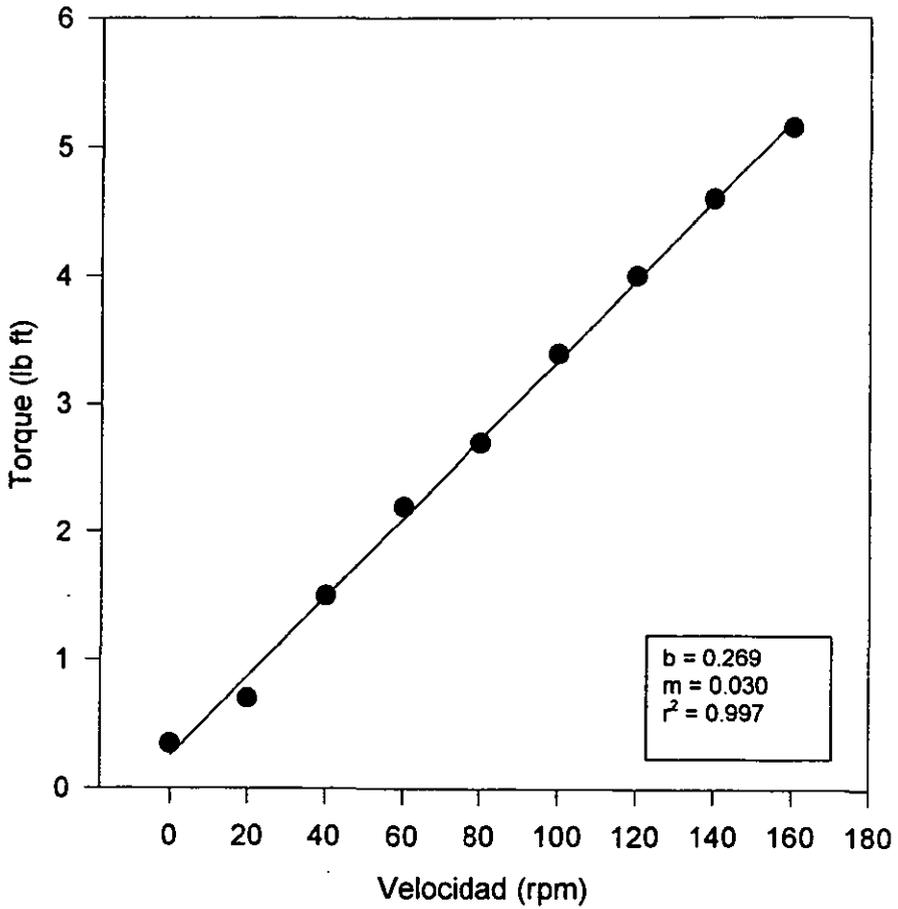


Figura 4.5. Consumo de potencia,  
Glucosa 85%

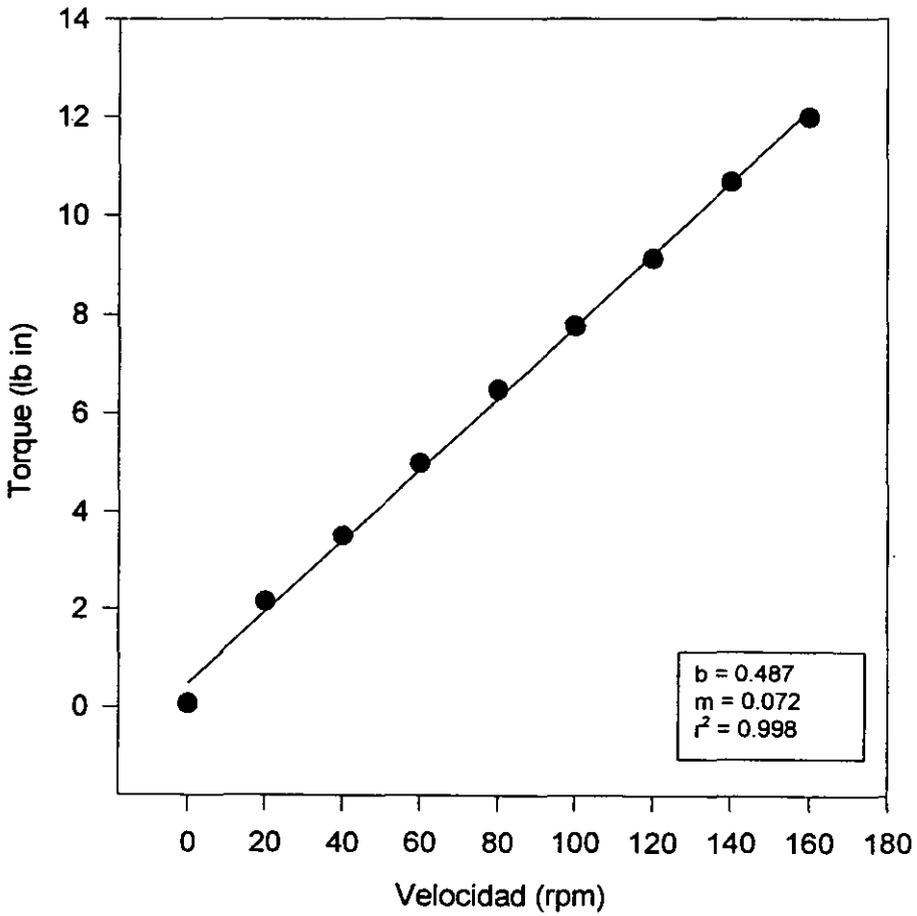


Figura 4.6. Consumo de potencia,  
Glucosa 90%

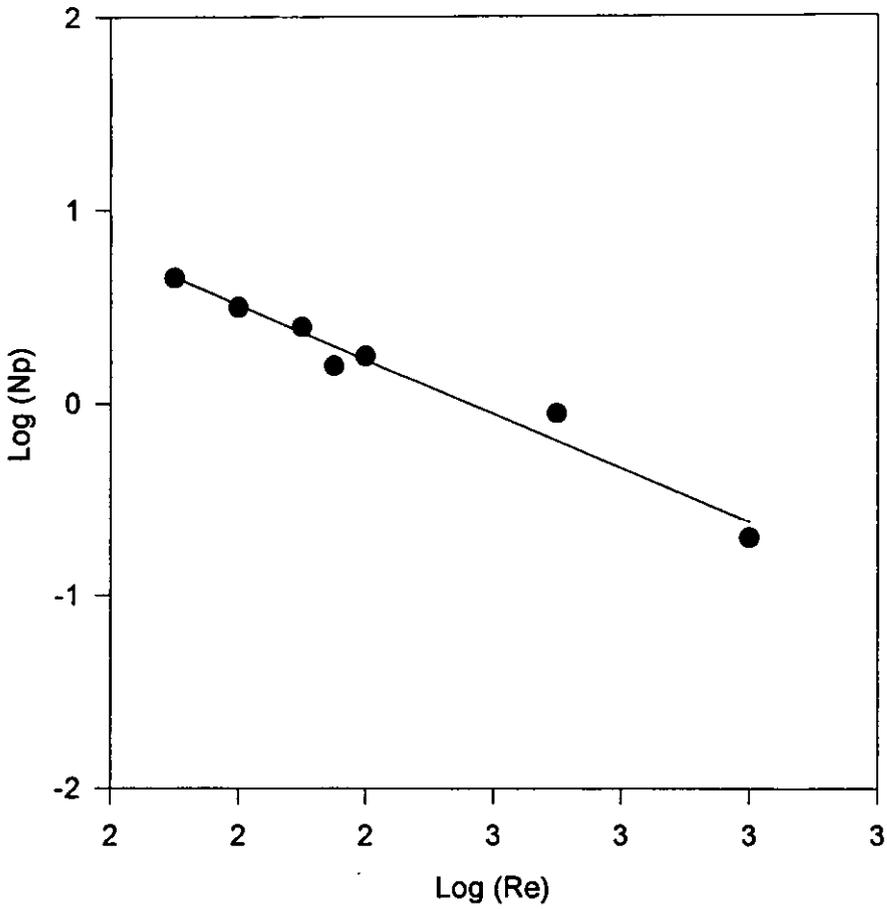


Figura 4.7. Relación Log (Re), Log (Np).  
Glucosa 85%

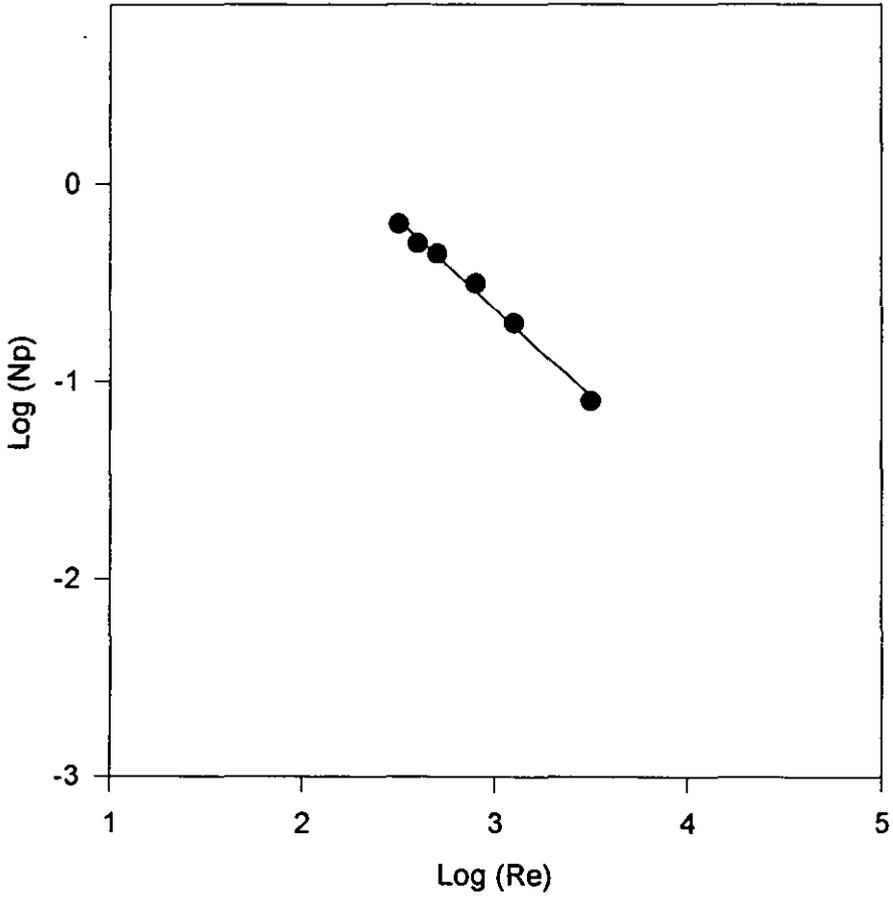


Figura 4.8. Relación Log (Re), Log (Np).  
Glucosa 90%

De esta experimentación se desprende finalmente que el valor de  $K_p$  (constante dependiente del sistema de agitación para fluidos newtonianos), concuerda con otros valores de impulsores helicoidales semejantes, tal como lo reporta Nuñez (1996), como se muestra en la tabla 4.3. El valor obtenido de  $K_p$  fue de 147.6.

*Tabla 4.4. Valores de  $K_p$  reportados bibliográficamente.*

Autor	$K_p = NpRe$
Nuñez (1996)	128.4
Brito de la Fuente (1994)	135.2
Chavan y Ulbrecht (1973)	146.6
Nagata et al. (1972)	142.8

Un estudio mas reciente realizado por Espinoza (1997), muestra que el valor de  $K_p$ , para un impulsor dual, no corresponde a la suma de los  $K_p$  de sus componentes. Encontró que la hélice tiene un valor de 138.8 y una turbina de 72, y el impulsor acoplado con ellos, tiene un valor de 340.

8. Se visualizo el patrón de flujo existente en el sistema de agitación, esto se llevó acabo utilizando una técnica colorimétrica (ver Anexo 4), y realizando una grabación en video-8mm; dicho patrón se propuso para observar las zonas muertas del sistema, análogas a centros térmicos, sin embargo, existe la limitante del diseño del tanque, que no permite la colocación de sensores en los puntos de mayor interés. Este patrón de flujo, muestra semejanza con otros estudios realizados (Tanguy et al.1997), Figura 1.27.

## 5. CONCLUSIONES

---

Se pudo observar que las estrategias de estudio existentes para fluidos no newtonianos, no se han aceptado en todos los ámbitos, a pesar de que existen otras alternativas, la analogía de flujo couette resulta adecuada para el estudio a realizarse; primeramente porque se pretende cumplir con las condiciones en que se basa, y porque estudios análogos lo han empleado, además, claro, de que sus principios teóricos están bien fundamentados.

De los resultados que se han mostrado, puede concluirse que el valor de  $K_p$ , que se obtuvo concuerda con otros valores de sistemas semejantes, pues si consideramos que cualitativamente es una medida del consumo de potencia, se mostró que el valor obtenido para el impulsor dual es mayor que en el caso de uno de sus componentes (cinta helicoidal).

Existe la problemática planteada por Nuñez (1996), sobre el cálculo del parámetro  $\phi$ , del método de Wilson. La cual surgió a raíz de la limitante en las variaciones de velocidad; se pretende considerar la recomendación hecha por este autor, y hacer un mayor número de variaciones, para lo cual se plantea la utilización de fluidos con viscosidad aparente mayor.

Adicionalmente, y en concordancia con los estudios de la funcionalidad de  $K_p$  con los parámetros reológicos, se pretende estudiar sobre el particular, utilizando para tal fin fluidos no newtonianos en el estudio.

De la visualización de patrones de flujo, puede concluirse, que se aproxima a los resultados obtenidos por simulación numérica. Sin embargo, las zonas muertas que se tienen bajo características de régimen laminar, no necesariamente son las zonas de estudio, pues el diseño del impulsor lo impide en cierto grado.

Una alternativa podría ser el cambiar el diseño del tanque y colocar los sensores en la pared del tanque para poder tener un registro en las zonas de interés, como son la parte baja del agitador, y el espacio entre la flecha y la hoja de la hélice. Cabe mencionar que deben realizarse estudios adicionales sobre el patrón de flujo, utilizar fluidos newtonianos y otras técnicas, como las mencionadas en la revisión bibliográfica.

Un punto de importancia que pudo observarse en la revisión bibliográfica es la importancia de la viscoelásticidad en la hidrodinámica de los sistemas de mezclado. Hasta este punto la viscoelasticidad no ha sido considerada, por lo cual se vé la necesidad de caracterizar completamente los fluidos, estudiando si presentan o no estas propiedades y asegurar un comportamiento reológico.

De los avances de resultados que se han presentado y en relación al proyecto planteado y sus objetivos, puede observarse que solamente se ha cubierto una parte de estos; como se mostró, se obtuvieron parámetros y valores de utilidad en el resto del proyecto. Haciendo esta consideración el avance que se tiene es de 30 a 40 %. La terminación va de acuerdo al plan de estudios de la maestría en ciencias de alimentos, que implica el trabajo experimental de dos semestres adicionales.

Las actividades experimentales posteriores son como lo indican los objetivos particulares y el plan general de trabajo presentado.

## BIBLIOGRAFÍA

---

Aiba, S. Flow patterns of liquids in agitated vessels.  
A. I. Ch. E. Journal. 4 (4) 485-489, 1958.

Armenante, P. y Chun-Chiao C. Velocity profiles in a baffled vessel with single or double pitched-blade turbines.  
A. I. Ch. E. Journal. 42 (1) 42-54, 1996.

Bird, R.B. y Armstrong, R.C., Hassager, O. "Dinamics of polimeric liquids"  
John Wiley and Sons, Inc. 1987, U.S.A.

Bourne, J.R. y Butler, H. Power consumption of helical ribbon impellers in viscous liquids.  
Trans. Instn. Chemical engineering. 47, 128-136, 1969.

Brito de la Fuente, E., Leuliet, J.C., Choplin, L., y Tanguy, P.A. Mixing and circulation times in rheologically complex fluids.  
A.I.Ch. E. S. S. (121) 75-96, 1990.

Brito de la fuente, E., Leuliet, J.C., Choplin, L. Y Tanguy, P.A. On the effect of shear-thinning behavior on mixing with a helical ribbon impeller.  
A. I. Ch. E. S.S. 286, 28-32, 1992.

Brito de la Fuente, E., Nuñez, M.C. y Tanguy, P.A. Non-Isithermal mixing of reologically complex fluids with close-clearance impellers: Effect of natural convection.  
Chemical Engineering Technology, (20) 203-207, 1997.

Brito, de la Fuente, E., Choplin, L. Y Tanguy, P.A. Mixing with helical ribbon impellers.  
Trans. I, Chem. E. 75 Part A, 45-52, 1997.

Carreau, P.J., Charest, G. y Corneille, J.L. Heat transfer to agitated non-newtonian fluids.  
Canadian journal of chemical engineering. 3 (8) 1966.

Carreau, P.J., Chabre, R.P. y Cheng, J. Effect of rheological properties on power consumption with helical ribbon agitators.  
A. I. Ch. E. Journal. 39 (9) 1421-1430, 1993.

Chavan, V.V. y Uibretch, J. Power Correlations for close clearance helical impellers in non-newtonian liquids.  
Ind. Chemical engineering process. 12 (4) 472-476, 1973.

- Chavan, V.V., Ford, D.E. y Arumugan, M. Influence of fluid rheology on circulation mixing and blending.  
Canadian Journal of Chemical E. 53 628-635, 1975.
- Charm, Stanley. "Chemical Engineering".  
AVL. Publishing. 1978, 3ª edición. U.S.A.
- Cheng, Jianya y Carreau, P.J. Aereated mixing of viscoelastic fluids with helical ribbon impellers.  
Chemical Engineering Science. 49 (12) 1965-1972, 1965.
- Cutter, L.A. Flow and turbulence in a stirred tank.  
A. I. Ch. E. Journal. 12 (1) 35-43, 1966.
- Edwards, M.F. Mixing of low-viscosity liquids in stirred tanks.  
Chemical Engineering, 131-141, 1985
- Elson, T.P. X-Ray flow visualization of flow patterns during the mixing of yield stress, newtonian and dilatant fluids.  
Chemical engineering comm. 94, 143-158, 1990.
- Espinoza S. Teodoro. "Caracterización hidrodinámica de sistemas de agitación duales".  
Tesis Doctoral, UNAM. 1998.
- Espinoza, S. T., Brito de la Fuente, E., Tecante, A. y Tanguy, P.A. Power consumption of a dual turbine-helical ribbon impeller in ungasged conditions.  
Chemical engineering journal. 67 215-219, 1997.
- Fand, R.M. y Keswani, K.K. Heat transfer and the Grashof numer.  
International journal of heat transfer. 16, 1175-1191, 1973.
- Geankoplis, J.G. "Procesos de transporte y operaciones unitarias"  
Editorial: CECSA; primera edición México, D.F. 1993.
- Gekas, Vassilis. "Foods properties"  
CRC. Press, 1992. 1ª Edición, U.S.A.
- Hamm, S., Brodkey, R.S. y Fasano, J.b. local heat transfer in mixing vessel using a high-efficiency impeller.  
Ind. Engineering chemical. 32, 575-576, 1993.
- Hamby, N; et al. "Mixing in the process industries".  
Editorial Butterworth-Heinemann; segunda edición. Gran Bretaña 1992.
- Harvey, A., Lee, C.K. y Rogers, S.E. Steady-State Modeling and experimental measurement of a baffled impeller stirred tank.  
A. I. Ch. E. Journal. 41 (10) 2177-2186, 1995

Ho, F.C. y Kwong, A. A guide to designing.  
Chemical Engineering. 23, 94-104, 1973.  
Holman, J.P. " Heat Transfer"  
McGraw-Hill, 1972, 3ª edición, U.S.A.

Kuriyama, M., Ohta, M., Yanagama, K., Arai, K. y Saito, S. "Heat transfer and temperature distributions in an agitated equipped with helical ribbon impeller".  
Journal of Chemical engineering of japan. 14 (4) 323-330, 1981.

Lamberto, D.J., Muzzio, F.J. y Swanson, P.D. Using time-dependt rpm to enhance mixing stirred vessels.  
Chemical Engineering Science. 51 (5) 733-741, 1996.

Masiuk, S., Lacki, H. y Strek, F. Power consumption and mixing times for liquids mixing in a ribbon mixer.  
Chemical engineering journal. 49, 135-140, 1992.

Metzner, A.B. y Reed, J.C. . Advances in agitation engineering.  
A. I. Ch. E. Journal. 1 434-445, 1955

Metzner, A.B. y Otto, R.E. Agitation of non.newtonian fluids.  
A. I. Ch. E. Journal. 3 (1) 3-10, 1957.

Metzner, A.B. y Dodge, D.W. Turbulent flow of non-newtonian systems.  
A. I. Ch. E. Journal. 5 (2) 189-204, 1959.

McDonough, Robert. "Mixing for the process industries".  
Editorial: Van Nostrand Reinhold; primera edición. New York, U.S.A. 1992.

Nagata, S. y Yanagimoto, M. Studies on the mixing of high viscous liquids.  
Journal of chemical engineering. 21, 278-289, 1957.

Nagata, S., Kishikawa, M., Katsube, T. y Takaish, K. Mixing of Highly viscous non-newtonian liquids.  
Int.Chemical engineering. 12 (1) 175-182, 1972.

Nomura, T., He, Y. y Takahashi, K. Development and mixing characteristics of folding anchor impeller for round-bottomed flask.  
Journal of Chemical engineering J. 29 (1) 134-138, 1996.

Nuñez, M.Carmen. "Transferencia de calor en tanques agitados para fluidos pseudoplásticos"  
Tesis De Maestria, UNAM. 1996

Perry, R.H. y Chilton, C. "Manual del ingeniero químico"  
5ª edición, Prentice Hall. México, 1989.

Peters, D.C. y Smith, J.M. Mixing in anchor agitated vessels.  
Canadian Journal of chemical engineering. 47, 268-271, 1969.

Pláček, J. Tavlarides, L.L. y Smith, G.W. 'Turbulent Flow in Stirred Tanks.  
A.I.Ch.E. Journal. 32 (11) 1771-1786, 1986

Ramasubramanian, A. Agitation and heat transfer studies in suspensions.  
Transactions of the ASME. 117, 224-226, 1995.

Rieger, F. Y Novak, V. Power consumption of agitators in highly viscous non-newtonian liquids.  
Trans. Instn. Chemical engineering. 51, 101-111, 1973.

Rogers, B.B. The importance of Prandtl number in mixed-Convection instability.  
Transactions of the ASME. 115, 482-486, 1993.

Rutherford, K. et al. Hidrodinamic characteristics of dual rushton impeller stirred vessels.  
AIChE Journal. 42 (2) 332-346, 1996.

Sachs, J.P. y Rushton, J.H. Discharge flow from turbinr type mixing impellers.  
Chemical engineering progres. 50 (12) 597-603, 1954.

Saravacos, Y. y Moyer, B. Heating rates of fruit products in an agitated kettle.  
F. Tech. 21, 54A-58<sup>a</sup>, 1967.

Sawinsky, J., Harvas, G. Y Deak. A. Power requirement of anchor and helical ribbon impellers for the case of agitating newtonian and pseudoplastic liquids.  
Chemical engineering science. 21, 507-509, 1976.

Shamlou, P.A. y Edwards, M.F. Power consumption of helical ribbon mixers in viscous newtonian and non-newtonian fluids.  
Chemical engineering science. 40 (9) 1773-1781, 1985.

Takahashi, K., Sasaki, M., Arài, K. y Saito, S. Effects of geometrical variables of helical ribbon impellers on mixing of highly viscous newtonian liquids.  
Journal of chemical engineering jap. 15, 217-224, 1982.

Tanguy, P.A., Thibault, F. y Brito de la Fuente, E. A new investigation of the Metzner-Otto concept for anchor mixing impellers.  
Canadian Journal chemical engineering. 74 (4) 222-228, 1996.

Tanguy, P.A., Thibault, F., Brito de la Fuente, E., Espinoza, T. y Tecante, A. Mixing performance induced by coaxial flat blade-helical ribbon impellers rotating at different speeds.  
Chemical Engineering Science. 52 (11) 1733-1741 1997.

Uhl, V.W. "Mechanically aided heat transfer"  
Academic-Press, 1ª edición, 1967, U.S.A.

Van't Riet, K. y Smith, J.M. The behaviour of gas-liquid mixtures near Rushton turbine blades.  
Chemical engineering science. 28, 1031-1045, 1973.

Welty, J.R., Wicks, C.E. y Wilson, R.E. "Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa".  
2ª edición, John Wiley & Sons, Inc. México, 1972.

# ANEXOS

---

## ANEXO 1

### OBTENCIÓN DE LA CURVA DE POTENCIA

1. Obtener la viscosidad del fluido en cuestión, utilizando un reómetro o un viscosímetro
2. Obtener la densidad del fluido, utilizando un fluido o un picnómetro.
3. Obtener por análisis de las ecuaciones y basándose en las propiedades del fluido y las características del tanque de agitación, las condiciones de velocidad para mantener el régimen laminar en el sistema de agitación, utilizando la siguiente ecuación y considerando que el régimen laminar se tiene cuando  $Re < 10$ .

$$N = \frac{Re \mu}{d^2 \rho}$$

4. Obtener los valores de torque residual del sistema de agitación para los diferentes niveles de variación de velocidad.
5. Realizar variaciones de velocidad para una N máxima calculada en el punto 3, y obtener los valores del torque de cada variación de velocidad.
6. Con los niveles de variación de velocidad ensayados, la viscosidad y densidad del fluido, obtener los correspondientes valores de número de Reynolds.
7. Con los valores obtenidos de torque y velocidad rotacional, obtener los correspondientes valores de consumo de potencia, según la ecuación.

$$P = 2\pi N(T-T_0)$$

8. Con los valores calculados de consumo de potencia, calcular los correspondientes valores de número de potencia  $N_p$ , según la ecuación:

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

9. Graficar los correspondientes valores de número de potencia vs número de Reynolds. Dicha gráfica debe ser en escala Log-Log.
10. De la gráfica obtenida, la pendiente de la curva debe mantener un valor de  $-1$  y la ordenada al origen es el valor correspondiente de  $\log$  de  $K_p$

---

## ANEXO 2

### CALCULO DE K<sub>S</sub>

1. Realizar la curva de potencia ( $N_p$  vs  $Re$ ) de un fluido newtoniano en régimen laminar, para el tipo de geometría del agitador en cuestión.
2. Obtener el reograma ( $\eta$  vs  $\dot{\gamma}$ ), del fluido no newtoniano a utilizar, utilizando para ello un reómetro o viscosímetro.
3. Para una velocidad de agitación  $N$ , calcular el consumo de potencia del fluido no newtoniano en el sistema de mezclado. En la curva de potencia newtoniana, leer el valor de  $Re$  correspondiente, y despejar de este el valor de viscosidad.
4. Con el valor de viscosidad obtenido, leer en el reograma del fluido no newtoniano, la velocidad de corte, misma que se denomina velocidad de deformación promedio ( $\dot{\gamma}_{avg}$ ).
5. Elaborar una gráfica de velocidad de deformación promedio ( $\dot{\gamma}_{avg}$ ) vs  $N$ .
6. La pendiente de la curva  $\dot{\gamma}_{avg}$  vs  $N$ , es el valor de  $K_s$ .

---

## ANEXO 3

### EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERENCIA DE CALOR. (METODO DE WILSON)

1. Establecer un sistema tal que las pérdidas de calor al exterior sean mínimas y puedan considerarse despreciables.
2. El sistema debe estar diseñado para que el calor que cede el medio de calentamiento sea absorbido por el fluido que se encuentra en el interior del sistema de agitación.
3. El balance diferencial de calor debe considerar la disipación viscosa producida por el impulsor.

La ecuación que describe el fenómeno y que considera las ecuaciones de conservación de energía y de transferencia de calor es:

3.2. Balance de calor en el medio de calentamiento:

$$Q_1 = mC_p(T_e - T_s)$$

3.2. Balance de calor en el fluido a calentar:

$$Q_2 = mC_p(T_w - T_i)$$

3.3 Balance global del sistema:

$$Q_3 = U A \Delta T_m$$

Si se considera que no existen pérdidas de calor al medio externo:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

Con las ecuaciones anteriores podemos realizar el cálculo de U de la siguiente manera:

$$U = \frac{Q}{A\Delta T_m}$$

Y con ello podemos obtener el valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor, mediante la definición del coeficiente global:

$$\frac{1}{h_i} = \frac{1}{U} - \frac{x}{k} - \frac{1}{h_o}$$

En donde  $x/k$  es la resistencia a la transferencia de calor debida a la pared del tanque y  $1/h_o$  la resistencia debida al medio de calentamiento.

Si consideramos a  $x$ ,  $k$  y  $h_o$ , como constantes pues dependen del material del sistema de agitación y de la naturaleza del medio de calentamiento, y si éstas además se mantienen constantes.

De esta forma obtenemos:

$$\frac{x}{k} + \frac{1}{h_o} = \phi$$

Definiendo a  $\phi$ , como la suma de resistencias entre la pared del tanque y el fluido de calentamiento. Despejando el valor de  $\phi$ , obtenemos:

$$h_i = \frac{1}{U^{-1} - \phi}$$

Expresando el valor de  $h_i$ , en forma de un número adimensional:

$$\frac{h_1 D}{k} = \alpha \left( \frac{d^2 N \rho}{\mu} \right)^\beta \left( \frac{C p \mu}{k} \right)^\lambda \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^\delta$$

Los valores de los coeficientes  $\beta$ ,  $\lambda$  y  $\delta$  se pueden considerar según los estudios realizados o realizando un análisis de regresión múltiple.

## ANEXO 4

### EVALUACIÓN DEL PATRON DE FLUJO, TECNICA COLORIMETRICA

1. Montar el sistema de agitación en cuestión; el tanque debe ser de material transparente (vidrio o acrílico), el fluido de trabajo puede ser glicerina, pero debe asegurarse que el régimen que se manejará sea el adecuado (laminar).
2. Se adicionan 100 ml de indicador (Azul de Bromotimol);
3. Se alcaliniza el sistema por adición de 1ml de NaOH (1N) en 100 ml de glicerina. El sistema se colorea mostrando el patrón de flujo desarrollado por el impulsor.
4. La reacción completa acido-base, finaliza por la adición de 2 ml de HCl (1N) en 100 ml de Glicerina, lo cual muestra en forma de coloración inversa el patron de flujo.
5. Los cambios en la coloración del sistema se videograban, pudiéndose realizar posteriormente un análisis por zonas del sistema, solarizaciones o obtención de negativo, para una observación mas detallada.

## ANEXO 5

### MANUAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE AGITACIÓN

#### 1. Carga del tanque

1.1 Verificar que el tanque este completamente limpio

1.2 Cuando el fluido de trabajo se desarrolla en el tanque:

1.2.1. Pesar la cantidad de sustancia espesante (goma), a adicionar para la concentración requerida

1.2.2 Medir la cantidad de agua necesaria para dispersar la goma y obtener la concentración requerida

1.2.3 Pesar la cantidad de  $\text{NaN}_3$ , a utilizarse como agente antifungico, requerido (100 ppm)

1.2.4 Arrancar el sistema de agitación (ver mas adelante), y adicionar el espesante de lentamente de manera que no se forman grumos

1.2.5 Tomar una muestra del fluido y determinar sus parámetros físicos (temperatura, densidad, viscosidad)

1.2.6. Colocar la tapa del tanque, con las precauciones de orientación de la misma con respecto a los niveles establecidos

1.3 Cuando el fluido de trabajo esta desarrollado previamente

1.3.1 Llenar del recipiente contenedor, el tanque de agitación hasta el nivel indicado

1.3.2 Colocar la tapa del tanque, con las precauciones de orientación de la misma con respecto a los niveles establecidos

#### 2. Encendido del sistema de propulsión.

2.1. Encender la fuente de alimentación de corriente.

2.2. Verificar que el variador de velocidad se encuentre en apagado y en su nivel de velocidad cero

2.3. Acoplar el eje del motor a la flecha del agitador, mediante el cople adecuado

2.4. Encender el Equipo de medición de torque, y verificar que la medición

*marcada coincide con su escala de cero*

*2.5. Encender el variador de velocidad y llevar a la velocidad de trabajo lentamente.*

*3. Registro de los valores de Temperatura.*

*3.1. Previamente se colocará un termopar a la entrada y otro a la salida de la chaqueta del tanque, así como un termómetro en el interior del tanque.*

*3.2. Los termopares antes indicados así como los que se encuentran en el interior del tanque se conectan al banco de datos, con especial cuidado de asignar los canales y los polos adecuados a cada uno*

*3.3. El banco de adquisición de datos se conecta a un equipo de computo en el cual este cargado el software Metashel Model 5000.*

*3.4. Los datos de salida de los termopares se registran automáticamente en la memoria de la computadora, sin embargo, es necesario realizar el traspaso de estos, con 2 horas como máximo, que es lo que permite la memoria del banco.*

*4. Registro de los valores de Torque.*

*4.1. Aunque el torquimetro con el que se cuenta es susceptible de conectarse a una interfase de computo, en este momento la adquisición de datos es manual. Notando que el equipo tiene un sistema de filtrado de información que permite obtener una medida promedio de varios datos puntuales que se dan en un segundo.*

*Se pretende adaptar el sistema al paquete de Software Lab View, el cual permite entrada y salida de datos, así como la programación completa del proceso. El desarrollo de esta adaptación forma parte del trabajo de seminario ya mencionado.*

*5. Medición de la velocidad angular.*

*5.1. La medición de la velocidad puede realizarse graduando el variador de velocidad aunque resulta muy impreciso, por lo cual suele hacerse por dos métodos.*

- 5.1.1 *Medición por cronómetro, que consiste en colocar un señalador en la flecha del motor y contar las revoluciones que se verifican en un cierto tiempo (por ejemplo un minuto).*
- 5.1.2 *Medición por medio de tacómetro digital. Este equipo despide un haz de luz que reflejada por un medio adecuado realiza la medición.*
- 5.2. *La adquisición de los datos de velocidad, se realiza en forma manual pues el equipo no cuenta con puertos de entrada ni salida de datos.*