

99  
2 es.

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEZCLADO BIFASICO UTILIZANDO UN MEZCLADOR ESTATICO TIPO KENICS

### TESIS

PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
Area Mecánica

PRESENTA:  
RICARDO LOPEZ MARMOLEJO

ASESOR: M. EN I. GABRIEL ASCANIO GASCA  
DIRECTOR: DR. ALBERTO TECANTE CORONEL

MEXICO, D. F.

1998

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

260572



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**A Dios:**

Que es el ser más importante en mi vida. Sin su ayuda no podría haber llegado muy lejos. Nunca me cansaré de agradecerle la oportunidad de hacer de mi vida algo que realmente valga la pena. Gracias por todo lo que me ha dado y sobre todo por estar a mi lado en todo momento.

Mi más profundo agradecimiento.

**† A Armando Chávez Agnì:**

Quien estuvo tan cerca de culminar sus estudios. Le dedico este trabajo que está basado en un gran esfuerzo, como el que realizó él mismo durante sus estudios. A pesar del lugar en que se encuentra, quiero que sepa que siempre lo recordaré como a un entrañable amigo y gran universitario.

**A mi madre:**

A la cual adoro y a la cual le debo la culminación de mis estudios profesionales. No es posible edificar sin los cimientos bien establecidos, mismos que ella inculco en mi. Nunca olvidaré el café que me llevaba a las tres de la mañana, no se si surtió efecto el café, pero si todas sus atenciones y su cariño.

Muchas gracias.

**A mi padre:**

Al cual debo mi existir, y para quien guardo un gran respeto y cariño, le agradezco todo el apoyo brindado a lo largo de mis estudios. El hacerlo sentir orgulloso de mi fue un importante impulso para terminar mis estudios.

Mil gracias.

**A mis hermanos:**

**Graciela, Patricia, Ana María, Claudia, Silvia, Armando y Guillermo.**

Con un infinito agradecimiento, porque sus sacrificios y apoyo fueron día a día mi mayor compromiso, y por enseñarme que la vida es una constante lucha en la cual ustedes siempre me acompañan. Quiero que sientan este logro como el suyo propio, espero no defraudarlos jamás. Aunque se los digo poco los amo.

Gracias por creer en mi.

**A mis sobrinas:**

**Carolina y Alexandra.**

A las cuales amo, y por esto les dedicó una de las satisfacciones más grandes de mi vida; mi título profesional. Quiero que sepan que su sonrisa siempre fue una motivación extra en los momentos más difíciles. Recuerden que la vida comienza cuando uno define realmente lo que quiere de ella.

Gracias.

**A mis amigos:**

**Haydeé, Francisco, Adán, Huitzi, Hugo, Edgar, Lázaro, Efraín.**

Por los buenos y malos momentos que hemos pasado juntos y por que son personas incondicionales para mi. Gracias por su sincera y desinteresada amistad, y por enseñarme el verdadero valor de la misma. Esperando que aunque tomemos caminos diferentes, estemos siempre juntos.

Gracias.

**A Manuel Palacios, Antonio López Ferrer y muy en especial a Manuel Cuevas Tellez.**

Agradeciéndoles toda la ayuda y confianza que han depositado en mi, misma que es correspondida, verdaderamente me alegra que estén conmigo en un momento tan importante.

Gracias.

**A mi Tío Antonio:**

El más sincero agradecimiento por la gran ayuda y apoyo que me ha brindado a lo largo de mi vida, su confianza y su valiosa amistad siempre fueron muy importantes y motivantes para seguir adelante.

Muchas Gracias.

**Al M. en I. Gabriel Ascanio Gasca:**

Quien es un ejemplo profesional a seguir.

Con un gran respeto, agradeciéndole todo su apoyo, sus invaluable consejos, la confianza que depósito en mí, pero sobre todo, su amistad.

**Al Dr. Alberto Tecante:**

Gracias por compartir sus valiosos conocimientos conmigo y dedicarme su tiempo y paciencia.

**A la Universidad Nacional Autónoma de México:**

Para la cual guardo un profundo agradecimiento y cariño por haberme dado la oportunidad de formarme profesionalmente dentro de ella.

**A la Facultad de Ingeniería**

De la cual estoy sumamente orgulloso de haber pertenecido.

**Al Centro de Instrumentos**

Por haberme permitido desarrollar este proyecto dentro de sus instalaciones.

**Al financiamiento del proyecto CONACYT no. 0972P-A**

Por haber hecho posible la realización de este proyecto gracias a su financiamiento.

**A los Sres. Pedro Alvarado, José Luis Juárez y Luis Velázquez**

Quienes colaboraron de manera externa para la realización de este proyecto.

# ÍNDICE

<b>JUSTIFICACIÓN</b>	1
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	2
<b>OBJETIVOS PARTICULARES</b>	3
<b>HIPÓTESIS</b>	3

## **I. GENERALIDADES**

<b>1.1 PROCESO DE MEZCLADO</b>	4
<b>1.2 EQUIPOS DE MEZCLADO</b>	4
1.2.1 Selección del equipo	6
<b>1.3 TANQUES AGITADOS</b>	7
1.3.1 Diseño de tanques agitados mecánicamente	8
1.3.2 Potencia en tanques agitados	9
1.3.3 Consumo de potencia en tanques agitados	10
1.3.4 Impulsores	11
<b>1.4 DESCRIPCIÓN DE MEZCLADORES ESTÁTICOS</b>	13
1.4.1 Operación de mezclado con mezcladores estáticos	14
1.4.2 Consideraciones de diseño	16
1.4.3 Tipos de mezcladores estáticos	20
1.4.4 Aplicaciones de mezcladores estáticos	25
1.4.5 Guía general para el diseño de un mezclador estático	26
1.4.6 Comparación entre tanques agitados mecánicamente y mezcladores estáticos	39
1.4.7 Sistemas Bifásicos	41
<b>1.5 MÉTODO NO ESTACIONARIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA</b>	42

## **II DESARROLLO EXPERIMENTAL**

<b>2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA</b>	44
<b>2.2 CRITERIOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO</b>	44
<b>3.3 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO</b>	45
<b>2.4 CONDICIONES EXPERIMENTALES</b>	52
<b>2.5 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE TRANSFERENCIA DE MASA</b>	53

## **III RESULTADOS**

<b>3.1 RESULTADOS</b>	54
-----------------------	----

## **IV CONCLUSIONES**

<b>4.1 CONCLUSIONES</b>	61
<b>4.2 RECOMENDACIONES</b>	62

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	63
-----------------------------------	----

<b>APÉNDICE</b>	65
-----------------	----

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Mecanismos de contacto gas-líquido para sistemas de baja viscosidad	5
1.2	Diferentes tipos de impulsores	12
1.3	División del flujo en un mezclador estático tipo Kenics	15
1.4	Incremento del número de capas en un mezclador estático	18
1.5	Diferentes tipos de mezcladores Sulzer	21
1.6	Mezclador estático tipo Kenics	22
1.7	Orientación de los elementos en un mezclador Kenics	23
1.8	Mezclador HEV	25
1.9	Selección del número de elementos para el mezclador estático	28
1.10	Caída de presión por elementos para varios diámetros del mezclador estático	33
1.11	Factor de fricción de Darcy para tubería comercial	35
1.12	Determinación del tamaño de gota en una dispersión gas-líquido en función de la velocidad y diámetro del mezclador estático	37
1.13	Determinación de la velocidad en función del flujo y diámetro del mezclador estático	38
1.14	Concentración de oxígeno vs tiempo	43
2.1	Conexión de la bomba	46
2.2	Diagrama experimental del mezclador estático	47
2.3	Sistema de mezclado construido	49
2.4	Mezclador estático construido	51
3.1	Gráfica de la prueba No. 11	55
3.2	Desorción de oxígeno con el tiempo en el mezclador estático	57
3.3	Representación semilogarítmica de la desorción de oxígeno con el tiempo	58
3.4	Regresión para obtener $K_{La}$ en la prueba No.9	59
3.5	Regresión para obtener $K_{La}$ en la prueba No.11	60



## **LISTA DE TABLAS**

1.1 Opciones en función de la caída de presión	29
1.2 Diseño y selección del diámetro del mezclador estático	30
1.3 Caídas de presión	31
1.4 Valor del coeficiente de flujo	34
1.5 Comparación entre tanques agitados mecánicamente y mezcladores estáticos	40
2.1 Características de la bomba	46
2.2 Accesorios del sistema de mezclado	48
2.3 Características del mezclador estático	51
2.4 Condiciones experimentales de operación	52
2.5 Condiciones de caudal en las pruebas realizadas	52
2.6 Propiedades del aceite comestible empleado en las pruebas	53
3.1 Resultados de las pruebas realizadas	54

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo y caracterización de un prototipo de un sistema de mezclado bifásico. El equipo consta de un mezclador estático construido a partir de un tubo transparente de acrílico y una serie de elementos helicoidales en su interior. Dicho mezclador se encuentra acoplado a un arreglo de tubería, tanques y conexiones. Por otro lado, el sistema cuenta con la instrumentación necesaria para determinar flujos volumétricos, oxígeno disuelto y presión. Se presentan también los resultados de las pruebas realizadas empleando aceite comestible y nitrógeno en fase gaseosa.

Dicho sistema de mezclado consta de dos tanques de acrílico cristal (transparente), y una bomba de 1/8 hp con una capacidad de 62 L/min y con una columna de agua de 8 m. La tubería empleada es de PVC de 2.54cm (1") de diámetro y de este mismo material son los accesorios de la tubería (codos, tees, válvulas, etc.).

El mezclador estático utilizado es del tipo Kenics, con 18 elementos helicoidales alineados a 90° entre un elemento y otro. Dichos elementos están contruidos en acrílico cristal y tienen 25.4 mm de diámetro y 25.4 mm de longitud. Las dimensiones del conducto que contiene los elementos son 25.4mm de diámetro y 50 cm de longitud con un espesor de 3mm.

El sistema también consta de toda la instrumentación necesaria para poder cuantificar las variables requeridas. Para realizar la medición del volumen de líquido circulante, se colocó un rotámetro con un rango de 0-38 L/min. inmediatamente después de la bomba. También se utilizó un rotámetro con un rango de 0-100 L/s. para controlar el caudal del gas. La caída de presión en el mezclador estático se determina mediante un par de manómetros colocados antes y después del mezclador estático.

Se ocupó un electródo medidor de oxígeno disuelto para poder determinar la desorción de oxígeno desplazado por el gas (Nitrógeno) a través de la tubería. El electródo se conectó a un amplificador, el cual registra la señal obtenida del medidor de oxígeno. El amplificador a su vez se encuentra conectado a una interfaz, la cual permite percibir la señal del amplificador y enlazarla a una computadora, para obtener las gráficas de resultados en el paquete de la interfaz.

## JUSTIFICACIÓN

El mezclado es una de las operaciones más utilizadas en la industria química, ya que es muy difícil que se presente un proceso sin la necesidad de una operación de mezclado en alguna parte de él. Es por esto que la industria química requiere de la ingeniería para el diseño y construcción de los sistemas necesarios, aunque contradictoriamente, dentro de la formación académica de un ingeniero químico o mecánico, no se concede gran importancia a la enseñanza de procesos y equipos de mezclado y se omite la importancia que tiene en los ingenieros la selección de equipos, el establecimiento de condiciones de operación y la importancia de inferir resultados, los cuales son muy importantes para realizar un análisis y con esto llevar a cabo eficientemente un proceso.

La información que se obtiene de los laboratorios y pruebas piloto es de suma importancia, tanto para establecer reglas de escalamiento como para experiencias empíricas y de esta manera sumar investigaciones y bibliografía para desarrollar ecuaciones y correlaciones que tanta falta hace en operaciones de mezclado, y cuya ausencia se acentúa aún más en países como México donde se desarrolla muy poco el diseño en general.

El presente trabajo de tesis, surge motivado por los siguientes aspectos:

- 1.-Necesidad de comprensión del fenómeno de transferencia de masa gas-líquido en mezcladores estáticos.
- 2.-Necesidad de comprensión del flujo de fluidos con una fase líquida y una gaseosa, basada en un análisis típico de mecánica de fluidos que permita conocer el comportamiento hidrodinámico del sistema. Por ejemplo, un análisis típico de la relación factor de fricción vs Reynolds, caída de presión, patrones de flujo y consumo de energía en flujo bifásico. El objetivo es desarrollar procedimientos de diseño menos empíricos y criterios de selección basados en consideraciones cuantitativas más que cualitativas.
- 3.-En el caso particular de la tesis, se diseñó un prototipo usando todavía algunas recomendaciones de la literatura, no exentas de empirismo, con el objeto de probar o explorar la posibilidad de usar el prototipo en una aplicación muy particular: la desorción de oxígeno en aceite comestible. Por lo tanto hay un diseño y una aplicación del mismo. Cada parte tiene sus objetivos,

pero dada la estrecha relación entre el flujo de fluidos y la transferencia de masa, el funcionamiento del sistema no es simple. El trabajo constituyó un primer acercamiento al estudio de esta aplicación particular no sólo porque parece tener ventajas sobre métodos convencionales sino porque no existen estudios sistemáticos en la literatura que permitan evaluar verdaderamente dichas ventajas en términos desde luego de la transferencia interfásial.

## **OBJETIVO GENERAL**

Construir y probar un sistema de mezclado bifásico a nivel laboratorio, usando un mezclador estático, para poder analizar su funcionamiento.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- 1.-Determinar las características de diseño, construcción y operación que debe reunir el mezclador estático para llevar a cabo una eficiente transferencia de masa gas-líquido.
- 2.-Probar el sistema propuesto con una posible aplicación potencial, como en el caso de la desorción de oxígeno en aceite comestible.

## **HIPÓTESIS**

A través del uso de un mezclador estático, se efectuará eficiente y rápidamente la desorción de oxígeno con nitrógeno en aceite comestible.

## **OBJETIVO GENERAL**

Construir y probar un sistema de mezclado bifásico a nivel laboratorio, usando un mezclador estático, para poder analizar su funcionamiento.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- 1.-Determinar las características de diseño, construcción y operación que debe reunir el mezclador estático para llevar a cabo una eficiente transferencia de masa gas-líquido.
- 2.-Probar el sistema propuesto con una posible aplicación potencial, como en el caso de la desorción de oxígeno en aceite comestible.

## **HIPÓTESIS**

A través del uso de un mezclador estático, se efectuará eficiente y rápidamente la desorción de oxígeno con nitrógeno en aceite comestible.

## **OBJETIVO GENERAL**

Construir y probar un sistema de mezclado bifásico a nivel laboratorio, usando un mezclador estático, para poder analizar su funcionamiento.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- 1.-Determinar las características de diseño, construcción y operación que debe reunir el mezclador estático para llevar a cabo una eficiente transferencia de masa gas-líquido.
- 2.-Probar el sistema propuesto con una posible aplicación potencial, como en el caso de la desorción de oxígeno en aceite comestible.

## **HIPÓTESIS**

A través del uso de un mezclador estático, se efectuará eficiente y rápidamente la desorción de oxígeno con nitrógeno en aceite comestible.

# **CAPITULO 1**

## **GENERALIDADES**



# GENERALIDADES

## 1.1 PROCESO DE MEZCLADO

El mezclado puede ser definido como la incorporación de dos o más porciones disímiles de un material, con el que se logra un nivel deseado de uniformidad, ya sea físico o químico, en el producto final. También se utiliza el mezclado para incrementar la velocidad de procesos que involucran reacciones químicas o bioquímicas, así como para mejorar la transferencia de masa y de calor [6].

Las operaciones de mezclado se encuentran muy ampliamente difundidas en las industrias cuyos procesos involucran cambios físicos y químicos como en la industria farmacéutica, de alimentos, papel, plásticos, etc. Estas operaciones son, en ocasiones llevadas a cabo con un nivel muy grande de empirismo. Adicionalmente no existen códigos de diseño de equipo de mezclado que sean ampliamente aceptados [7]. Por otra parte, los equipos de mezclado están poco instrumentados, por lo que las deficiencias en la operación sólo se vuelven obvias por una mala calidad del producto y los sobrediseños no se detectan [8].

Algunas operaciones industriales importantes por su volumen, involucran el contacto entre gases y líquidos. El objetivo de tales procesos es agitar la mezcla gas-líquido, generando la dispersión de las burbujas de gas en una fase líquida continua. La transferencia de masa tiene lugar a través de la interfase gas-líquido que se crea. En estos casos, el movimiento del fluido reduce el grosor de la película de resistencia, es decir, incrementa el gradiente de concentraciones inmediatamente adyacente a la superficie de la partícula o de la fase a transferirse. Particularmente en esta situación, el término “mezclado” incluye un proceso de transferencia de masa [7].

El funcionamiento del equipo para tales operaciones, puede ser caracterizado por medio de un coeficiente de transferencia de masa interfacial ( $K_L a$ ), el cual es el producto del coeficiente interfacial  $K_L$  y el área superficial,  $a$ .

## 1.2 EQUIPOS DE MEZCLADO

A nivel industrial existen diversos tipos de mezcladores, dentro de los más importantes se encuentran:

### a) Agitados mecánicamente

- Impulsor helicoidal (con excelentes resultados para la mezcla de dos líquidos altamente viscosos)
- Turbina Rushton (propia para la transferencia de oxígeno en mezclas gas-líquido, pero sin un mezclado homogéneo como en el caso de fermentadores biológicos).
- Impulsores comerciales Chemineer y otras firmas

b) Mezclador estático, propios para realizar un mezclado homogéneo en sistemas bifásicos (gas-líquido).

En la industria química los equipos más empleados para la dispersión y mezclado bifásico de gas-líquido, son los tanques agitados mecánicamente, pero también existen otros tipos de mezcladores como los mezcladores estáticos, los eyectores de gas-líquido, los mezcladores de reacción a chorro y otros equipos que ya no son considerados propiamente como mezcladores, como son columnas de burbujas, columna de plato y torres de spray (ver Figura 1.1).

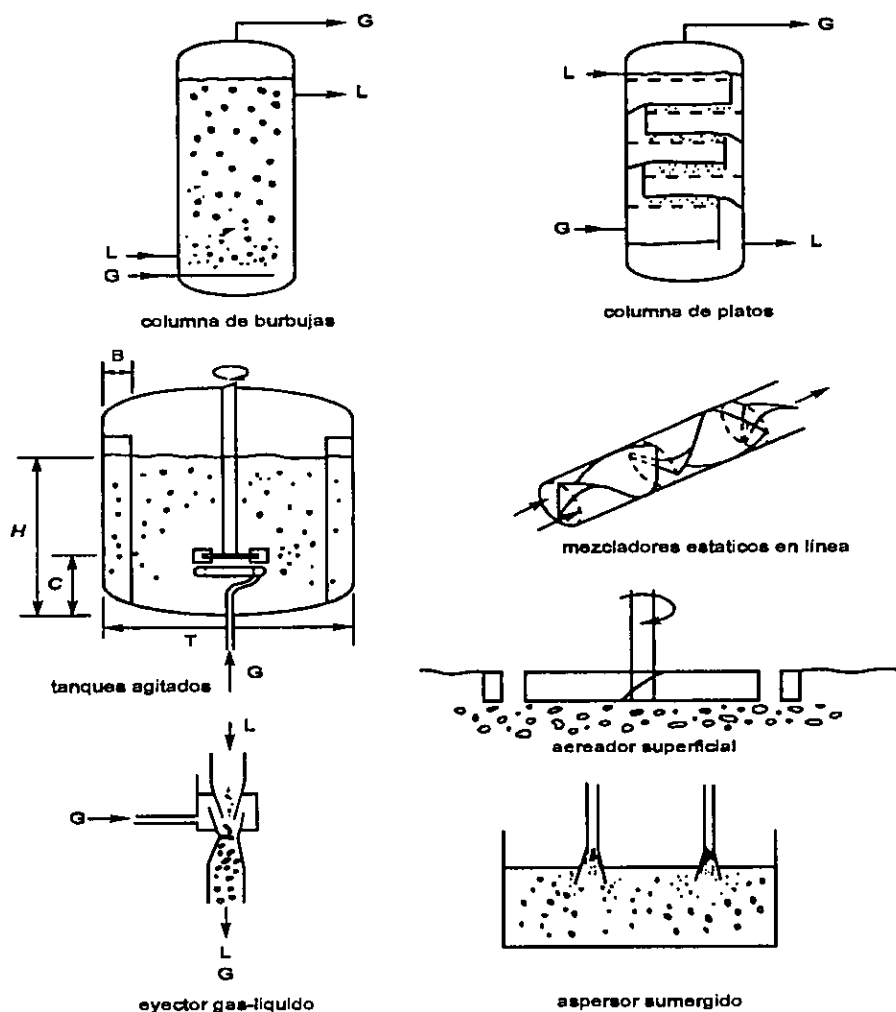


Figura 1.1 Mecanismos de contacto gas-líquido para sistemas de baja viscosidad

A continuación se presenta una breve descripción de algunos equipos de mezclado más importantes a nivel industrial:

### **Columna de burbujas**

Este equipo consiste de una columna en la cual el gas y el líquido entran desde el fondo del tanque creándose burbujas que van subiendo a través del líquido.

### **Columna de platos**

El gas entra por la parte inferior de la columna y al subir es redispersado y librado en cada plato de la columna.

### **Tanques agitados mecánicamente**

Son los equipos más utilizados en la industria química, los cuales consisten en un tanque que contiene los componentes a mezclar y un impulsor que puede ser de diferentes tipos, dependiendo de los requerimientos.

### **Mezcladores estáticos (en línea)**

Son los mezcladores en los cuales la energía de mezclado es proporcionada por una bomba. En este tipo de mezclado, el mezclador permanece inmóvil y los componentes a mezclar son obligados a pasar a través de él. El mezclado ocurre por una alteración del patrón de flujo del líquido o de los líquidos que hacen contacto.

### **Eyectores a reacción a chorro**

En este equipo, el gas se introduce a presión en un flujo líquido que circula por un tubo y es dispersado debido a la intensidad de la turbulencia.

### **Aspersores Sumergidos**

Este sistema, consta de un contenedor con líquido, y el gas es suministrado a presión dentro del líquido, propiciando el contacto entre las fases.

Cuando se tienen altas viscosidades es difícil alcanzar la turbulencia con los mecanismos descritos anteriormente, y en estos casos se emplean mecanismos que basan su funcionamiento en crear combinaciones y distribuciones de un corte laminar, entre los cuales se encuentran: el Dough mixers, Scraped, rotating disc contactor, entre otros.

## **1.2.1 SELECCIÓN DEL EQUIPO**

La selección del equipo más adecuado, está en función de diversos factores entre los que se encuentran:

- Los requerimientos de operación.
- La resistencia a la transferencia de masa del gas o del líquido.
- Las características de los componentes a mezclar.
- La reología de los componentes.
- La presencia de partículas sólidas.

- Los requerimientos de transferencia de calor.
- La composición de cada fase.
- Las limitaciones de gas libre y de espuma.

Cabe señalar que no existe un método de diseño establecido para tomar en cuenta cada uno de los factores y es que tanto la selección como el diseño del equipo, basan gran parte de sus decisiones en investigaciones experimentales ( debido al poco entendimiento que se tiene de mezclas gas-líquido), las cuales se llevan a cabo creando sistemas de mezclado a nivel de laboratorio, con los cuales se prueba y se trabaja en el análisis de modelos y correlaciones que se requieren. Cabe señalar que también se ha aprendido mucho de las experiencias obtenidas en las industrias que han implementado algún sistema de mezclado.

En este trabajo, sólo se analizarán los tanques agitados mecánicamente y los mezcladores estáticos; los primeros debido a su gran flexibilidad y gran aplicación industrial, y los segundos por ser el tipo de mezclador propuesto para ser utilizado en el sistema de mezclado a construir considerando su importancia industrial.

Dentro de los equipos empleados industrialmente los de mayor uso han sido los tanques agitados mecánicamente, utilizando para la tarea de mezclado un impulsor, cuya variedad es muy extensa en cuanto a geometrías y tamaño. La selección del impulsor más adecuado es parte fundamental del diseño del sistema. Dos de los tipos de impulsores más comunes son el impulsor de hélice (con excelentes resultados para la mezcla de dos líquidos viscosos) y el impulsor Rushton (propio para la transferencia de oxígeno en mezclas gas-líquido, pero sin un mezclado homogéneo), de los cuales existe una gran cantidad de estudios y ecuaciones para su selección.

### 1.3 TANQUES AGITADOS

El equipo de mezclado más utilizado en la industria de proceso en general, es el tanque agitado mecánicamente. Este equipo puede ser empleado tanto en fermentaciones aeróbicas como anaeróbicas con un amplio tipo de células que incluyen microorganismos, células de plantas y animales.

En muchas aplicaciones de contacto gas-líquido, la turbina mas comúnmente empleada, es la turbina de seis paletas planas, llamadas Rushton. Este tipo de turbinas es considerado estándar y consta de seis paletas planas rectangulares equidistantes a  $60^\circ$ , cuya longitud es generalmente  $1/4$  del diámetro de la turbina y su ancho es  $1/5$  del diámetro del impulsor. Tres cuartas partes de la longitud de estas paletas se encuentra dentro del disco del impulsor [22].

El uso de este tipo de impulsor permite suministrar una alta cantidad de energía al flujo gracias a la presencia del disco en el diseño, el cual permite llevar a cabo una eficiente

dispersión del gas en el líquido, Lo cual resulta ser muy importante en procesos de fermentación. El diseño de impulsores Rushton se sigue estudiando, modificando el diseño original para hacerlo aún más eficiente, tal es el caso de los impulsores de paletas curvas.

En este tipo de impulsor la mayor parte de la transferencia de masa se lleva a cabo en la periferia del impulsor, que es la zona de mayor turbulencia.

El suministro de potencia en un sistema gas-líquido, está dado por el tamaño y tipo de cavidades de gas que se forman en la parte posterior del impulsor, la existencia de estas cavidades se debe a la formación de zonas de baja presión que se generan en la parte inversa de las paletas del impulsor. La fase gaseosa es arrastrada por los vórtices cilíndricos hacia la zona de baja presión, donde se forman las cavidades llenas de aire sobre la cara de succión de las paletas, la formación de estas cavidades es función de la velocidad de agitación y el flujo de aire entre otras variables, la formación de estas cavidades se puede observar con la ayuda de una lámpara estroboscópica.

### **1.3.1 DISEÑO DE TANQUES AGITADOS MECÁNICAMENTE**

El diseño de estos tanques para su utilización en procesos biotecnológicos y químicos involucra diferentes aspectos, como son: la selección del tanque (material de construcción, diseño geométrico, utilización de deflectores, etc.), así como algunos otros sistemas que puedan ser necesarios en un proceso como los sistemas de agitación, de aireación, de enfriamiento, de adición de nutrientes, además del monitoreo y control de las variables más importantes del proceso (automático o manual) [9].

Al diseñar un tanque agitado mecánicamente se debe establecer en primer término sus características, para que pueda cumplir con las funciones básicas para las que fue creado, como pueden ser: la homogeneización y transferencias de masa y calor. El diseño de los tanques agitados mecánicamente incorpora:

- a) Sus dimensiones geométricas.
- b) El número y tipo de impulsores.
- c) La capacidad del motor.
- d) Su capacidad para mezclar líquido y gas.
- e) Su capacidad de transferencia de masa.
- f) Su capacidad de transferencia de calor.
- g) El diseño mecánico (tanque, boquillas, conexiones, puertos, flechas, sellos, rodamientos y reductores de velocidad).

Muchos tanques agitados mecánicamente a nivel laboratorio están hechos de vidrio con tapas de acero inoxidable, mientras que los de nivel industrial son fabricados totalmente de acero inoxidable. La relación entre la altura del líquido y diámetro del tanque ( $H/T$ ), en los fermentadores industriales, es generalmente de 2:1 o 3:1 (la cual difiere de la estándar  $H=T$ , usada como parámetro de diseño). Usualmente, el sistema de agitación consta de dos o tres impulsores. La flecha de agitación entra por la parte superior o inferior del tanque, a través de un sistema de rodamientos y sellos mecánicos. La relación entre el diámetro del impulsor

y el diámetro del tanque es generalmente entre 0.3 y 0.5. La distancia más común entre los impulsores es de 1.0 o 1.5 veces el diámetro del impulsor. Se instalan generalmente cuatro deflectores equidistantes cuya finalidad es evitar la formación de vórtices, lo cual reduce considerablemente la eficiencia del mezclado. El ancho de los deflectores es comúnmente un décimo del diámetro del tanque. Para el caso de fermentaciones aeróbicas se utilizan difusores de orificio o de anillo para suministrar aire al interior del fermentador. Este difusor se coloca entre el impulsor inferior y el fondo del tanque [9].

### 1.3.2 POTENCIA EN TANQUES AGITADOS

A nivel industrial, la potencia transmitida al fluido se puede estimar con buena precisión a partir de mediciones de la corriente y del voltaje consumidos por el motor, suponiendo una eficiencia del 100%. En los casos de procesos de fermentación, el consumo de potencia por agitación es uno de los parámetros más importantes para determinar el comportamiento del sistema biológico.

La velocidad de rotación del impulsor regularmente es medida con un tacómetro de contacto. El sistema de agitación consta de un motor que proporciona el movimiento al impulsor, cuya velocidad de agitación se controla comúnmente con variadores de frecuencia o controles de velocidad para motores de DC según sea el caso y, la medición del torque y potencia regularmente se realiza con un torquímetro, basándose en un medidor de deformación (strain gage). Estos torquímetros se conectan a un amplificador para poder obtener las lecturas de torque, rpm, etc.

La potencia aplicada a los sistemas de agitación determina en gran parte el rendimiento de los procesos; es por esto que la potencia aplicada es de gran utilidad para el establecimiento de correlaciones entre la capacidad de oxigenación y mezclado, así como para la optimización de procesos.

Esta potencia suministrada tiene una fuerte repercusión en los costos de producción debido al gasto de la energía eléctrica del motor que mueve la flecha, por lo que la evaluación del consumo de potencia de un sistema de agitación mecánica es importante para estimar y asegurar la carga apropiada para los motores industriales.

Mientras mayor sea la potencia suministrada por unidad de volumen del tanque ( $P/V$ ), mayor será la capacidad de ese sistema de agitación para mezclar los fluidos y para transferir oxígeno de la fase gaseosa a la líquida o viceversa. Este parámetro ( $P/V$ ) es comúnmente utilizado como criterio de escalamiento [11]. La potencia volumétrica a nivel industrial para un tanque agitado mecánicamente es del orden de  $0.2-4 \text{ kw/m}^3$ , donde obviamente los valores más bajos se obtienen cuando se mezclan líquidos de baja viscosidad y los más elevados para fluidos más viscosos. A nivel laboratorio ( $\sim 0.1 \text{ m}^3$ ) las potencias típicas son de  $10-15 \text{ kw/m}^3$ , a nivel planta piloto ( $1-5 \text{ m}^3$ ) es común una capacidad de potencia de  $6-8 \text{ kw/m}^3$  [12]

En todos los dispositivos de mezclado con tanques agitados debe existir un flujo convectivo, de forma que no existan regiones estancadas dentro del tanque. Pueden presentarse situaciones en las que un mezclado excesivo es un desperdicio de energía, además de ser contraproducente, ya sea por la producción de espuma o como en el caso del mezclado de materiales biológicos, en el que un suministro excesivo de potencia o velocidades altas de agitación pueden dañar los microorganismos en suspensión.

Es importante resaltar que, en ciertos casos, un mezclado con un mayor suministro de energía o por tiempos prolongados puede causar más problemas que beneficios [7].

### 1.3.3 CONSUMO DE POTENCIA EN TANQUES AGITADOS

El requerimiento de potencia de un impulsor depende de las siguientes variables independientes:

$$P=f(\rho,\mu, N, D, T, H, w, \text{ etc.})$$

donde:

- $\rho$ .- Densidad
- $\mu$ .- Viscosidad
- N.- Velocidad del rotor
- D.- Diámetro del impulsor
- T.- Diámetro
- w.- Ancho de la paleta del impulsor
- H.- Altura del líquido

Donde P es la potencia suministrada por el impulsor y representa la velocidad de disipación de la energía en el seno del líquido. La potencia eléctrica requerida para activar el sistema de agitación excederá a P, ya que deben adicionarse las pérdidas por fricción en el motor mismo y las que se presentan en el acoplamiento entre el motor y la flecha, así como en chumaceras, bujes y rodamientos.

Para incluir todos los factores geométricos que influyen en el valor de la potencia, se tendría que tomar en cuenta el ancho y número de mamparas (baffles), la separación entre impulsores (en sistemas de impulsores múltiples) y la posición del impulsor con respecto al centro del tanque. Pero generalmente para simplificar la evaluación de la potencia, los factores geométricos que afectan el consumo de la misma, admitiendo que el efecto de muchos de los factores geométricos puedan ser despreciados, o bien, tomar como válidos los resultados obtenidos únicamente para el caso que se presente similitud geométrica, especialmente durante el escalamiento. Cabe señalar que los requerimientos de potencia que se calculan a partir de las curvas de potencia proporcionan una medida de la energía disipada en el líquido. Sin embargo, no proporcionan ninguna información de tipo cualitativo, es decir, la eficiencia en la disipación de dicha energía. Cuando se introduce aire a un tanque de mezclado con un impulsor girando a una velocidad N, la potencia consumida por el sistema de agitación disminuye, debido a la formación de cavidades llenas de aire en la parte posterior de las paletas de la turbina. Las situaciones de flujo gas-líquido que ocurren en las

inmediaciones del agitador y estas son extremadamente complejas debido a la presencia de las mencionadas cavidades de aire que juegan un papel muy importante en la determinación de la potencia [9].

En sistemas gas-líquido, el esparcimiento de chorros de gas, también involucra un consumo de potencia, pero esta no es significativa comparándola con la potencia mecánica, sin embargo estrictamente hablando, debería ser incluida en las ecuaciones para el consumo de potencia.

Existen diferentes formas de medir el consumo de potencia en los tanques agitados mecánicamente, dentro de los cuales se encuentran:

- a) Mediciones eléctricas.
- b) Dinamómetros (acoplados al motor o a la flecha de agitación).
- c) Dinamómetros de cojinete (neumáticos o hidráulicos).
- d) Torquímetros.
- e) Mediciones calorimétricas.
- f) Sistemas de sensores de esfuerzos y telemetría [9].

#### **1.3.4 IMPULSORES**

La función de los agitadores en un sistema gas-líquido es:

- 1) Romper el gas en pequeñas burbujas para incrementar el área interfacial.
- 2) Dispersar las burbujas por todo el líquido.
- 3) Conservar las burbujas en el líquido por tiempo suficiente.
- 4) Mezclar el líquido por todas partes del tanque.
- 5) Propiciar remolinos turbulentos para alimentar líquido desde las interfaces.
- 6) Mover el líquido propiciando intercambio de calor con la superficie y maximizando coeficientes de transferencia de calor.
- 7) Mantener partículas en suspensión.

En el caso de tanques agitados mecánicamente, se pueden utilizar diferentes tipos de impulsores, cuya finalidad es provocar el movimiento y mezclado de los fluidos en cuestión; mientras mayor sea la potencia suministrada por unidad de volumen, mayor será la capacidad del sistema de agitación para mezclar los fluidos y transferir gas a la fase líquida.

En los sistemas de agitación mecánica, se utilizan diferentes tipos de impulsor; la turbina Rushton ha sido el impulsor más utilizado y se considera como un impulsor remoto, ya que la relación entre el diámetro del impulsor y el diámetro del tanque ( $D/T$ ) es pequeña, es decir, no abarca una gran proporción del diámetro del tanque produciendo zonas estancadas en las inmediaciones de la pared [8]. La velocidad en la punta del impulsor típica para una turbina (impeller tip speed) se encuentra alrededor de 3 m/s [10].



El diseño de agitadores y tanques, con un impulsor Rushton de 6 paletas es el tipo más común y tradicional que se ha usado, sin embargo, después de muchos años de experiencias y estudios de la hidrodinámica de los sistemas, se ha demostrado que con impulsores con 12 o 18 paletas y un poco cóncavos se obtienen mayores ventajas que con el impulsor tradicional, y más aún, es posible que a medida en que se avanza en las investigaciones surgan mejores diseños.

En la figura 1.2 se muestran tres tipos diferentes de impulsores, los cuales son de los más utilizados industrialmente; estos impulsores son la turbina Rushton, el InterMIG y el impulsor helicoidal.

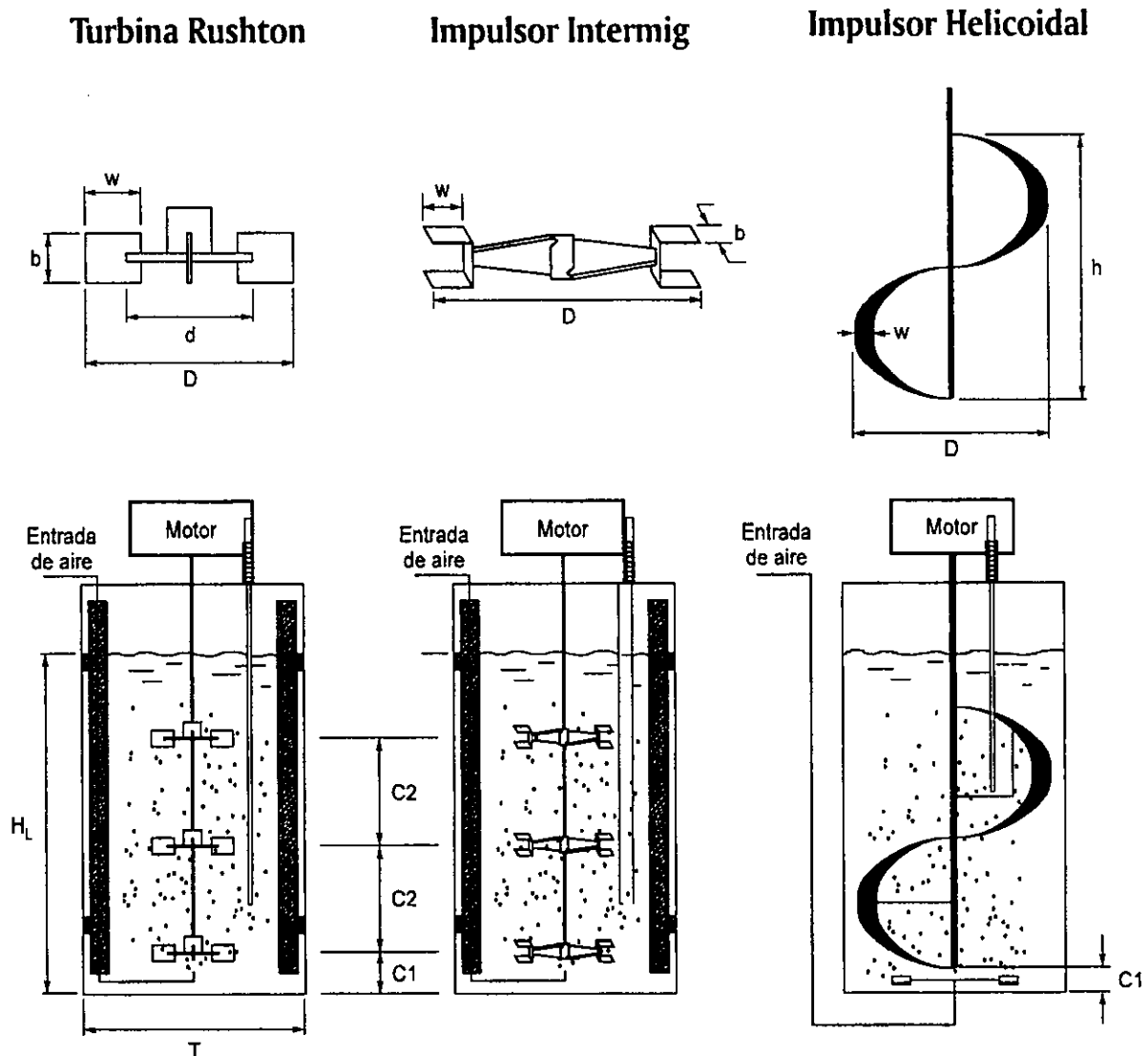


Figura 1.2 Diferentes tipos de impulsores

Una configuración con la que se han obtenido buenos resultados para contacto gas-líquido emplea un tanque cilíndrico, idóneo con paredes llenas de deflectores, con un ancho  $T/10$ . Típicamente a nivel industrial, 4 mamparas (baffles) son usados para tanques menores de 3m de diámetro, y 6 u 8 para tanques mayores. El gas entra por un agujero inferior a una distancia de  $D/2$  del agitador, si  $H=T$  será requerido un solo agitador, pero si  $H=2T$  o  $3T$ , se deben adicionar agitadores que deberán ser montados sobre la flecha, separados por una distancia  $T$ . Se recomienda que los impulsores con 18 paletas planas o 6 paletas cóncavas, tengan un diámetro  $D=T/4$  a  $T/2$ , montados a una distancia  $C=T/4$  a  $T/3$  del fondo del tanque [1].

El intervalo general de la aplicación de este tipo de sistema de mezclado es:

- Viscosidad del líquido superior a  $0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (Número de Reynolds  $\geq 10^4$ )
- Poder de entrada a la flecha de 1 a  $7 \text{ kW/m}^3$  (ocasionalmente arriba de  $15 \text{ kW/m}^3$  en tanques pequeños).
- Volumen superior a  $100 \text{ m}^3$

Una de las desventajas principales de los impulsores Rushton es la presencia de zonas muertas, lo cual puede ocasionar un mezclado poco homogéneo y en el caso de fermentadores puede dañar sistemas celulares. Por otra parte este tipo de impulsor consume una gran potencia que se refleja en los costos de operación.

#### 1.4 DESCRIPCIÓN DE MEZCLADORES ESTÁTICOS

Otro tipo de mezcladores, son los mezcladores estáticos, sobre los cuales no existe en la literatura mucha información sobre su diseño para el caso de flujo bifásico. Sin embargo para el mezclado monofásico, el empleo de este tipo de dispositivos resulta ser una buena opción, considerando que el producto obtenido es altamente homogéneo, lo cual es requerido a nivel industrial para la producción de medicamentos como aspirinas por ejemplo, donde es necesario que cada una de éstas tenga exactamente la misma cantidad de componentes químicos. Los mezcladores estáticos, también llamados mezcladores inmóviles, presentan una buena variedad en cuanto a diseño, dimensiones y tipos de fabricación.

Cuando se utiliza un mezclador estático, la eficiencia de mezclado depende de la caída de presión, del gasto del fluido y del número de elementos del mezclador estático, la adición de elementos proporciona una mayor intensidad en el mezclado pero una mayor caída de presión, mientras que la disminución de elementos nos da un menor mezclado, pero también menor caída de presión.

El mezclador requerido en un sistema bifásico (gas-líquido) debe:

- Incrementar el área superficial de las burbujas de gas por medio de su rompimiento en pequeñas burbujas.
- Maximizar el tiempo de residencia o retención del gas en el líquido.
- Proveer una velocidad de fluido lo suficientemente significativa para orientar las burbujas del gas hacia la parte inferior del tanque.

Los mezcladores estáticos son útiles en mezclas gas-líquido provocando una buena transferencia de masa con una baja caída de presión, la cual depende de las condiciones de operación y de los fluidos a mezclar.

Un efectivo diseño de un mezclador estático requerirá una pequeña energía a la entrada. Los costos de los mezcladores estáticos son significativamente más bajos que los mezcladores agitados mecánicamente, pero la falta de flexibilidad operacional puede presentar dificultades.

La utilización de un mezclador estático es factible cuando se tiene dispersión líquido-líquido, o gas-líquido, ya sea en régimen laminar o turbulento y también se han llevado a cabo pruebas mezclando sólidos, pero aún no se tienen resultados tan satisfactorios como cuando se trabaja con fluidos.

#### **1.4.1 OPERACIÓN DE MEZCLADO CON MEZCLADORES ESTÁTICOS.**

Cuando se requiere realizar una mezcla bifásica gas-líquido es necesario que el mezclador propicie el máximo contacto de las burbujas de gas con el líquido, lo cual se logra dividiendo las burbujas de gas en otras más pequeñas.

Los mezcladores estáticos en línea propician un buen mezclado al hacer chocar la corriente contra sus elementos y contra las paredes del conducto en el que se encuentran dividiendo la corriente inicial en otras más pequeñas y reorientándolas, como se muestra en la figura 1.3.

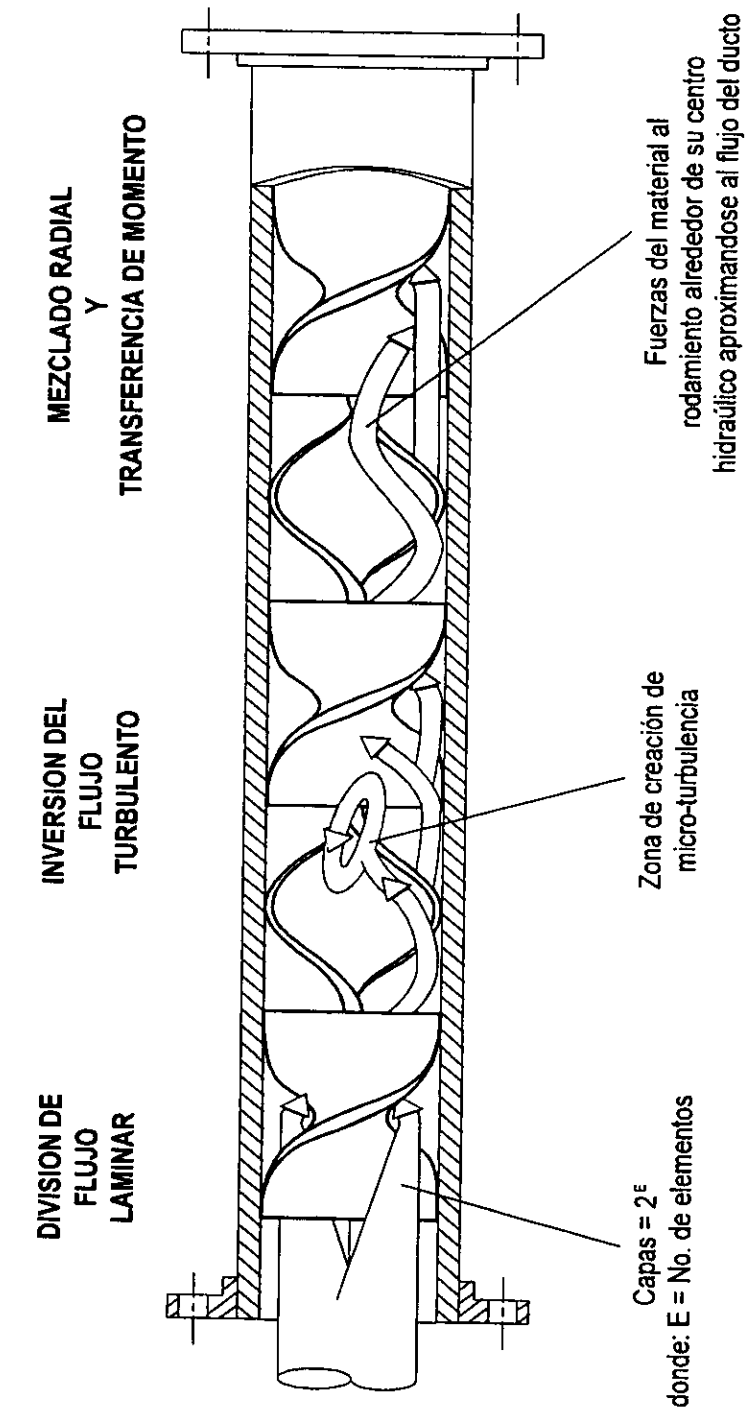


Figura 1.3 División de flujo en un mezclador Kenics

## 1.4.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Los mezcladores estáticos también llamados mezcladores inmóviles, son dispositivos que consisten de elementos insertados en un conducto en línea. La energía para el mezclado proporcionada por una bomba, está en función de la caída de presión ocasionada en el proceso por el paso de los fluidos a través de los elementos que componen el mezclador.

Así también, el número de elementos de que consta el mezclador estático, está en función de la dificultad que presenten los fluidos para mezclarse, mientras más difícil sea la tarea de mezclado más elementos se necesitarán.

Los mezcladores estáticos presentan una alternativa a los sistemas de agitación (mecánicos o neumáticos) dependiendo de las necesidades del mezclado y de los componentes a mezclar. Su campo de aplicación ha ido ganando terreno, ya que pueden emplearse tanto en flujo laminar como turbulento. En el caso de flujo laminar, el mezclado es llevado a cabo por una serie de divisiones, combinaciones y reorientación del flujo. En el caso de flujo turbulento, los elementos del mezclador estático causan una turbulencia mayor que es aprovechada para las tareas de mezclado.

El flujo de los fluidos en cualquier tipo de mezclador estático es complejo y difícil de describir cuantitativamente por la escasa teoría y ecuaciones que existen, y es por esto que los diseños se basan en pruebas experimentales y en experiencias de sistemas de mezclado ya realizados y muchas veces se van optimizando con base a prueba y error.

Al diseñar un mezclador estático, es necesario tomar en cuenta ciertas consideraciones entre las que destacan las que a continuación se mencionan.

### TRANSFERENCIA DE CALOR

Seguramente el mezclador estático se desarrolló primeramente para operaciones de mezclado en flujo laminar, pero han surgido otras características de interés práctico, como la transferencia de calor y la distribución del tiempo de residencia. Los coeficientes de transferencia de calor se incrementan considerablemente con el uso de mezcladores estáticos, y aunque el costo debido al consumo de energía puede ser alto, esto es una ventaja considerable, pues se reducen los gradientes de temperatura y los tiempos de contacto cuando se procesan fluidos sensibles a la transferencia de calor.

El incremento en el coeficiente de transferencia de calor se debe al aumento del mezclado radial en comparación con el tubo vacío; posiblemente también contribuya el "efecto aleta" que esta asociado con la presencia del elemento del mezclado (en especial si hay buen contacto entre el elemento y la pared del tubo). Es difícil relacionar las características de transferencia de calor de los mezcladores estáticos con los tubos vacíos, pero los mezcladores con baja caída de presión incrementan el coeficiente de transferencia de calor

en un 300%, para un incremento en la caída de presión del orden de 700%. Estas son algunas correlaciones simples para el mezclador Kenics:

para  $(L_t/D_t) < 30$ : 
$$Nu = 4.65 \left[ \frac{RePrDt}{L_t} \right]^{0.33}$$

para  $(L_t/D_t) > 30$ : 
$$Nu = 1.44(RePr)^{0.33}$$

y para los mezcladores Sulzer ( $L_t/D_t = 100$ )

$$SMX: Nu = 2.6(RePr)^{0.35}$$

$$SMXL: Nu = 0.98(RePr)^{0.38}$$

Para aplicaciones en transferencia de calor, el mezclador estático tiene una ventaja sobre el tubo vacío, la cual radica en la mayor uniformidad que se tiene en la distribución del tiempo de permanencia, y por lo tanto, reduce el riesgo de dañar componentes sensibles al calor. La uniformidad en el tiempo de permanencia tiene otras ventajas, en especial para el diseño de reactores tubulares de flujo continuo [1].

Esta característica no sólo simplifica el diseño sino que también nos da un ambiente más controlado para la reacción con respecto a qué tan completa es la reacción, minimiza los residuos, da uniformidad general al producto. Para reacciones no isotérmicas, también se puede aprovechar la mejoría de la transferencia de calor y se puede optimizar el diseño del reactor eligiendo adecuadamente el tipo y la longitud del elemento mezclador.

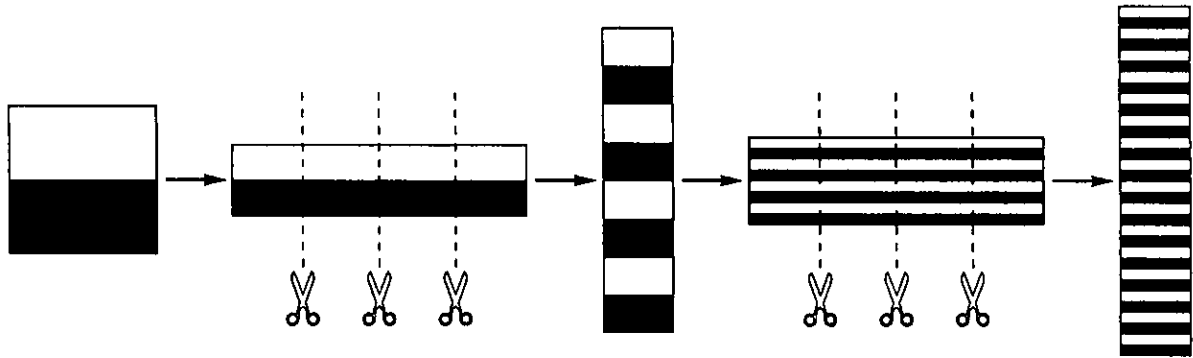
## **HOMOGENEIDAD**

El mezclado en régimen laminar con mezcladores estáticos es llevado a cabo por la formación de capas, mientras que el mezclado turbulento en su mayoría depende de los efectos de difusión de remolinos. El mezclado de sólidos es una aplicación muy rara de los mezcladores estáticos siempre limitada a productos no cohesivos, ya que si fueran cohesivos, causarían un taponamiento dentro del mezclador estático.

En muchas aplicaciones los procesos de mezclado son reforzados por un intercambio molecular (difusión o conducción de calor), aunque este intercambio molecular no se lleva a cabo si el mezclado es una distribución de partículas que no son solubles en la fase continua.

Si la homogeneidad del mezclado llevado a cabo dentro de un mezclador estático no es satisfactoria a las necesidades de un proceso, un mejoramiento es posible solamente rediseñando el sistema de mezclado (el tipo o tamaño del mezclador estático), mientras que en los mezcladores dinámicos la velocidad de rotación y su impulsor, pueden ser variados y optimizados.

El mezclado es llevado a cabo por una transportación continua transversal, siguiendo una recombinación del producto donde el número de capas es incrementado y su espesor reducido en cada elemento de mezclado, tal y como se muestra en la figura 1.4.



*Figura 1.4 Incremento del número de capas en un mezclador estático*

El número de capas producidas en el mezclado, puede ser calculado con la llamada “Ley de formación de capas”, que supone que el número de capas es multiplicado en cada elemento de mezclado, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$N = N_0 * C^n$$

donde:

$N_0$  = Índice de capas a la entrada del mezclador

$C$  = Constante que indica el número de cortes transversales en un elemento de mezclado.

$n$  = número de elementos de mezclado

Esta expresión, que se emplea para encontrar el número de capas, varía dependiendo del tipo de mezclador estático; para otros tipos de mezcladores tenemos:

a) Kenics

El número de capas es multiplicado por dos en cada elemento

$$N = N_0 (2^n)$$

b) Ross ISG

El número de capas es multiplicado por cuatro en cada elemento

$$N = N_0 (4^n)$$

c) Sulzer SMX

La formación de capas es determinada experimentalmente

$$N = N_0 (m / 2) (2m)^{n-1}$$

Cabe señalar que los resultados del cálculo, deben ser tomados con cuidado, ya que nos da el número de capas formadas idealmente, pero en realidad esto es válido, sólo en los primeros elementos del mezclador. Los elementos siguientes, no dividen las capas en el centro y algunas se recombinan uniformemente, el número de capas no siempre es suficiente medida de la homogeneidad. El máximo espesor de capa también debe ser tomado en cuenta e incluso en algunas ocasiones es aún más importante que el número de capas [2].

Pero no solamente se tiene que tener en cuenta la homogeneidad de la mezcla para decidir si es factible su uso, ya que no se deben perder de vista otros factores como la caída de presión, entre otros.

## MATERIALES

Los mezcladores estáticos están diseñados dimensionalmente de acuerdo a las tuberías estándar, para no tener conflictos al integrarlos al sistema.

Los mezcladores estáticos generalmente están realizados en acero al carbono y aleaciones de titanio, Monel 400, Níquel 200, Inconel, Tantalio, Circonio, PVC, Hastelloy y algunas otras aleaciones especiales.

Otros materiales que se utilizan en su construcción son:

PVC: PVC o CPVC de 1" a 12" de diámetro, utilizado para industria química

FRP: Mezcladores de fibra de vidrio de 4" a 60" para aplicaciones químicas y para la elaboración de pulpa y papel.

SAN: Son mezcladores pulidos a espejo de 1/2" a 4" de diámetro, ocupados en la elaboración de comida, bebidas, industria farmacéutica y cosméticos.

PTF Mezcladores de PTFE (teflón sólido) de 1" a 6" utilizados para alimentos, industria química, farmacéutica y cosméticos.

CLS Para un grado de limpieza superior del mezclador, los elementos están hechos de PTFE, kynar o Inoxidables tipo 316.

## CONSTRUCCIÓN

Cada elemento del mezclador estático es obtenido, por fundición o inyección gracias a un molde fabricado con anterioridad, el cual, es maquinado industrialmente en máquinas CNC (Control numérico). Cuando es necesario que las condiciones sean extremadamente higiénicas, se aproxima el acabado de los elementos a un acabado final a espejo y los elementos deberán ser removibles dentro del mezclador. Los elementos se insertarán uno



con otro de acuerdo a las necesidades del proceso, pueden ser soldados entre ellos, sólo ensamblados a presión o soldados a la pared del conducto.

Las dimensiones de los mezcladores y los materiales de los cuales esta hechos, varían de acuerdo a los distintos fabricantes de estos mezcladores, algunos de estos fabricantes cuentan con laboratorios en los cuales se pueden probar distintos materiales o diseños propuestos por el cliente, pero estos fabricantes en la actualidad sólo son extranjeros (E.U., Canadá, Inglaterra, Alemania), que son los países en donde más se utilizan este tipo de mezcladores, pero pueden ser distribuidos a cualquier otro país, por medio de distribuidores asociados.

### **1.4.3 TIPOS DE MEZCLADORES ESTÁTICOS.**

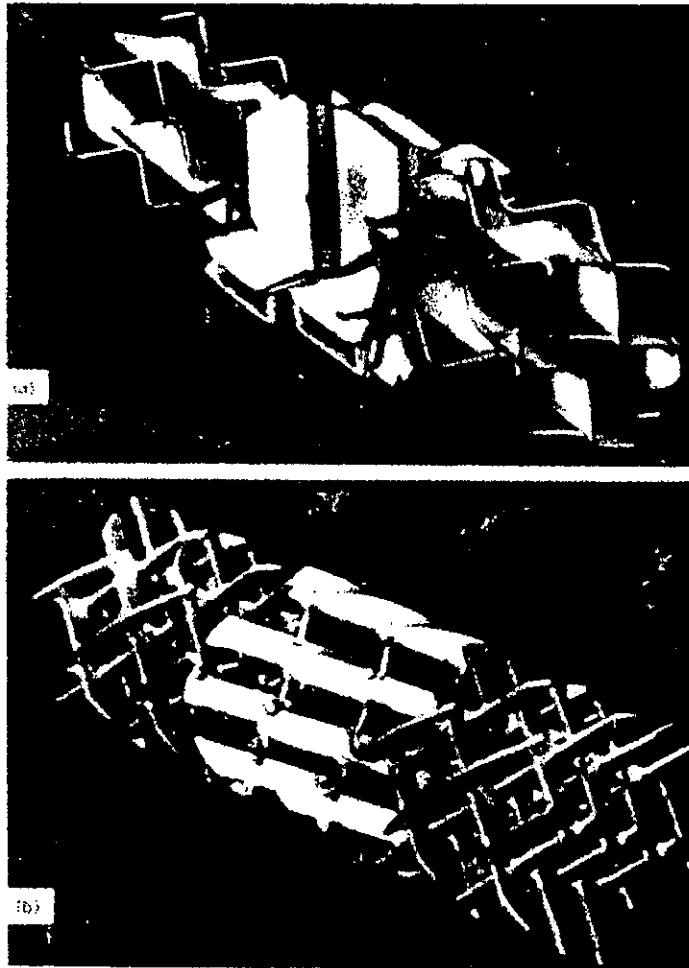
Los mezcladores estáticos han sido usados desde hace tiempo aunque sin la difusión actual. La forma más antigua en que se han usado mezcladores estáticos, se puede considerar que es la de columna empacada, en la cual se hace circular una fase pesada desde la parte superior de la columna y una fase ligera desde la parte baja de la columna, de esta manera por gravedad natural, la fase ligera tiende a subir y la fase pesada baja, propiciando el mezclado por contacto en contracorriente.

Uno de los primeros estudios de la calidad de mezclado en mezcladores estáticos en línea fue el de Hall and Godfrey, cuyo modelo de mezcla fue obtenido por varias combinaciones de elementos de mezclado usando pasta de arcilla de color en los fluidos para observar la manera en que se iban mezclando [1].

### **MEZCLADOR ESTÁTICO TIPO SULZER**

Sulzer desarrolló un diseño de multicanales en forma de “cartón de huevo” usando técnicas desarrolladas para producir empacadoras para gas-líquido en contacto. La intención del diseño es separar el fluido en corrientes individuales que encuentren otros chorros como ellos pero transversalmente propiciando el contacto y la mezcla [1].

Cada elemento del mezclador estático, mezcla principalmente en dos direcciones pues los elementos están alineados a  $90^\circ$  con respecto a su sucesor, para dar mezclado en todas las direcciones. Este diseño Sulzer se ha probado con resultados muy satisfactorios para flujo turbulento (con el mezclador SMV), pero también hay variaciones con las que se puede utilizar para flujo laminar (SMX) y transferencia de calor para fluidos viscosos (SMXL). Estos tipos de mezcladores se muestran en la figura 1.5.



*Figura 1.5 Diferentes tipos de mezcladores Sulzer*

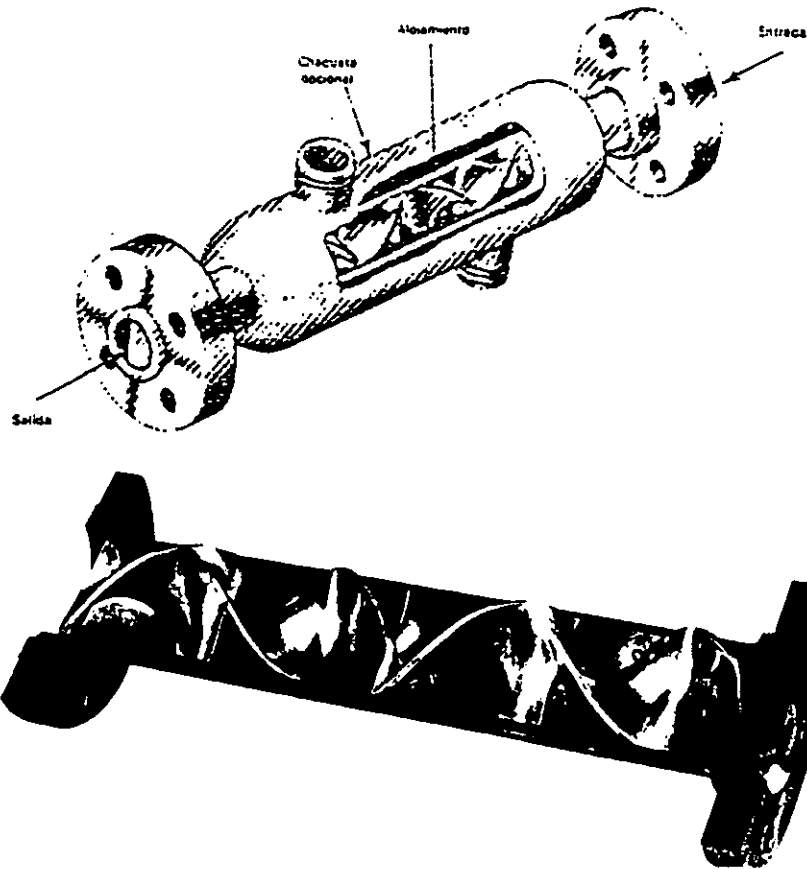
El diseño común que presentan los mezcladores Sulzer son sus abiertos e intersectantes canales circulares, los cuales están formados por láminas corrugadas y ondulantes en el caso del mezclador Sulzer SMV o por barras cruzadas como lo muestra el modelo Sulzer SMX.

Un diseño efectivo de un mezclador estático requerirá una pequeña energía a la entrada, los costos de los mezcladores estáticos son significativamente mas bajos que los mezcladores agitados mecánicamente, pero la falta de flexibilidad operacional puede presentar dificultades.

La utilización de un mezclador estático ha sido factible cuando se tiene dispersión líquido-líquido, o gas-líquido, ya sea en régimen laminar o turbulento y también se han llevado a cabo pruebas mezclando sólidos, aunque esto es todavía más complejo.

### MEZCLADOR ESTÁTICO TIPO KENICS

Otro diseño de baja presión es el mezclador Kenics, que al igual que el diseño Sulzer consiste en una serie de elementos de mezclado alineados a  $90^\circ$ , siendo cada uno de estos una pequeña hélice girada  $180^\circ$ , tal como lo muestra la figura 1.6. Estos elementos están ordenados alternativamente dentro de un conducto.

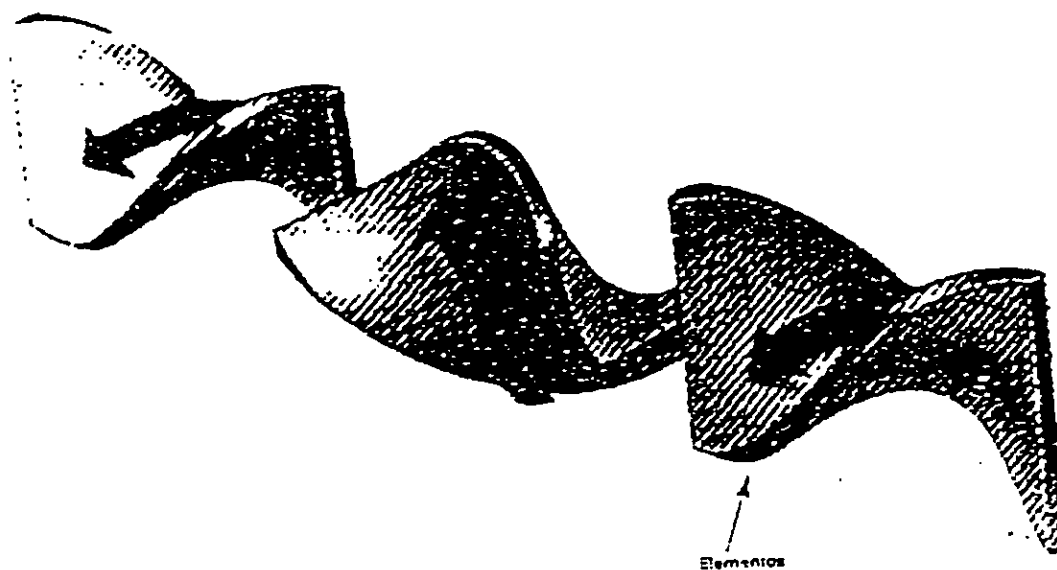


*Figura 1.6 Mezclador estático tipo Kenics*

Con este diseño se ha obtenido buena división de flujo, reorientación de flujo y mezclado radial con buenas características para el mezclado bifásico.

En este tipo de mezclador, el choque y la división del flujo resultan de combinar alternadamente los elementos girados a mano derecha y a mano izquierda, incrementando de esta manera la eficiencia del mezclado. Todos los componentes, son continua y completamente mezclados, eliminando los gradientes radiales de temperatura y velocidad.

Este tipo de mezclador produce un rápido mezclado debido a que el flujo circular cambia de dirección en cada intersección con otro elemento y produce el choque. Los elementos alternados del mezclador continuamente dividen y reorientan el flujo para producir un mezclado completo con un mínimo de caída de presión (ver figura 1.7). Los mezcladores Kenics, también aumentan bastante la transferencia de calor en comparación con los conductos vacíos, tanto para flujo laminar como para flujo turbulento. En el caso de una dispersión gas-líquido, el gas puede ser incorporado dentro del líquido, los valores de transferencia de masa son sumamente elevados para maximizar la absorción o reacción [1].



*Figura 1.7 Orientación de los elementos en un mezclador Kenics*

## **TIPOS DE MEZCLADORES KENICS**

### **Con elementos fijos KMS**

En los mezcladores estáticos Kenics con elementos fijos, los elementos en forma de hélice están pegados a las paredes del conducto que los contiene, esta unión puede ser por medio de soldadura o algún adhesivo dependiendo el material con el cual se esté trabajando. Este tipo de mezcladores se pueden usar para régimen de flujo laminar, turbulento o transitorio, ya sea que los problemas sean de mezclado o dispersión de líquidos o gases, este tipo de unión de los elementos es muy rígida, pero soporta los mayores esfuerzos.

### **Elementos removibles KMR**

Los elementos son fácilmente retirados del conducto, ya que se intersectan unos con otros, por medio de una muesca que presentan en el centro de su extremo y en la cual es introducido a presión el elemento siguiente, son usados también para flujos en cualquier régimen, donde se requiere un aseo o inspección periódica, para mezclado o dispersión.

### **Elementos ensamblados KMA**

Los elementos están insertados uno con otro, alternativamente y son introducidos al conducto. Se usan para controlar y asegurar el debido alineamiento y presenta una fácil instalación en cualquier conducto estándar. Este tipo de mezclador también es usado con cualquier régimen de flujo.

### **Tipo KME**

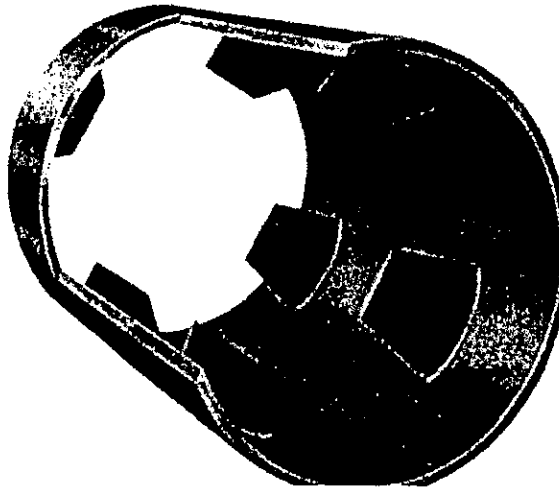
Usado para máxima transferencia de calor, polímeros reactivos y mezclado de líquidos con mucha diferencia de viscosidades, los elementos cortados son soldados a la pared del conducto, eliminando áreas muertas, desarrollado con una superficie interna final abajo de 8 micropulgadas.

Cualquiera de estos tipos de mezcladores Kenics, pueden soportar hasta 10,000 psi de presión y diámetros de hasta 8 pies. Estos mezcladores en su fabricación a nivel industrial son probados y certificados por la norma ASME/B31.3

## **MEZCLADOR ESTÁTICO TIPO HEV**

Este tipo de mezclador contiene en el interior del conducto, pequeñas aletas que maximizan la transformación de energía turbulenta en un eficiente mezclado (ver figura 1.8). El modelo HEV, produce un flujo uniforme, por medio del cual se controlan los vórtices generados por los elementos de mezclado.

La aplicación mas común de este tipo de mezclador es para un mezclado con un flujo en régimen turbulento, cada aleta del mezclador genera un par de chorros formados por vórtices que producen vigorosos choques y rápida uniformidad.



*Figura 1.8 mezclador HEV*

#### **1.4.4 APLICACIONES DE MEZCLADORES ESTÁTICOS**

En la industria química los mezcladores estáticos se utilizan en los procesos de alimentos, pulpa y papel y tratamiento de aguas, colaborando a la rapidez y control de los procesos, con un bajo costo y una alta eficiencia.

Los mezcladores estáticos tipo Kenics, están siendo usados actualmente en diversas operaciones de transferencia de masa y calor y dispersión gas-líquido.

**Agricultura:** Para la elaboración de fertilizantes y preparación de pesticidas y dispersión gas-líquido.

**Química:** Clorinación y oxidación, dispersiones acuosas y dilución de ácidos y bases.

**Cosméticos:** En dispersiones de aceite y aditivos de mezclado.

**Energía:** Adición de químicos, para aumentar la recuperación de aceite.

**Alimentos:** En el mezclado de componentes de alimentos, lavado de grasa y aceites con ácido. Dentro de la industria alimentaria, también se emplean los mezcladores Kenics en la dilución de jarabes, miel, jugos de frutas, en la preparación de chocolates, para mezclar puré de tomate, pastas salsas y condimentos. También para mezclar queso, suero y ensaladas, para introducir frutas licuadas en yoghurt, en la producción de helados de crema, mayonesas y gelatinas, sodas carbonatadas, aguas, cervezas y otras bebidas y también en el mezclado de saborizantes o colorantes y en la producción de leche.

**Farmacéuticos:** Mezclado de nutrientes, control de pH y esterilización.

**Pinturas y Resinas:** En la elaboración de tintas, colorantes y mezclado de solventes.

**Polímeros y plásticos:** Mezclado de reactivos y catalizadores y homogeneización térmica.

**Pulpa y papel:** Control de pH, mezclado de pulpa, preparación de sustancias químicas y baños, control de dilución y consistencia.

**Textiles:** Mezclado de aditivos, eliminación de gradientes de temperatura para llevar a cabo un calentamiento uniforme.

**Tratamiento de aguas potables y aguas negras:** Dilución de polímeros, control de pH, adición de sustancias químicas y mezclado instantáneo, así como desinfección y aereación.

Además de los anteriores también se emplean en el mezclado de fragancias, mezclado de cremas de diversas viscosidades, mezclado de soluciones glucosas y enzimas, y en la adición de ácido sulfúrico y ácido nítrico para controlar el pH.

#### 1.4.5 GUÍA GENERAL PARA EL DISEÑO DE UN MEZCLADOR ESTÁTICO

Para poder obtener un buen diseño del mezclador estático, es preciso considerar los factores que más influyen en su realización, como son:

- a) Las características de los componentes a mezclar
- b) La caída de presión
- c) Condiciones ambientales de operación
- d) Características geométricas y de materiales de construcción
- e) Características del flujo, ya sea de régimen laminar, transitorio o turbulento, lo cual es posible determinarlo mediante el número de Reynolds

A determinado número de Reynolds se produce un cambio complejo en el comportamiento de los flujos, lo cual sucede cuando el flujo deja de ser laminar y empieza a ser turbulento, en este proceso se dice que el régimen de flujo es transitorio. Para flujo en tubería el número de Reynolds puede ser calculado con la expresión siguiente:

$$Re = \frac{4Q\rho}{D(\mu)\pi}$$

Donde:

Re = Número de Reynolds

Q = Flujo [m<sup>3</sup>/s]

D = Diámetro de la tubería [m]

μ = viscosidad

La determinación del régimen de flujo influye en el número de elementos de que constará el mezclador estático, ya que en flujo laminar serán requeridos más elementos para alcanzar la homogeneidad, que en el caso de flujo turbulento.

El número de elementos que serán necesarios en una operación de mezclado se puede obtener mediante gráficas ya existentes, hechas experimentalmente con muy buena aproximación por parte de investigadores y fabricantes. Para ocupar estas gráficas es necesario conocer el número de Reynolds y el régimen de flujo establecido. (ver Figura 1.9), pero este número de elementos debe ser modificado si es afectado por alguno de los siguientes factores[5]:

a) Proporción de viscosidad

Si la proporción de viscosidad de los flujos a mezclar excede 1000 a 1, se deberán añadir de 2 a 6 elementos dependiendo si el régimen de flujo es turbulento o laminar.

b) Proporción del flujo volumétrico

Si la proporción del flujo volumétrico entre los fluidos excede 100 a 1, se deben añadir de 2 a 6 elementos respectivamente para flujo turbulento o laminar.

c) Con inyección

A menudo un inyector es instalado en el tubo del mezclador estático para asegurar una buena corriente a través del mezclador, en caso de que sea omitido el difusor en el diseño, se deben añadir 1 o 2 elementos extras para ocasionar un mezclado mayor compensando la falta de difusor.

d) Inmiscibilidad y Dispersión

Para conseguir un tamaño de gota uniforme se utilizan siempre 4 elementos más excepto cuando la inyección no sea en el centro del conducto, en cuyo caso se necesitarán 6 elementos más y si no existe un tiempo de residencia requerido se deberán incrementar los elementos necesarios.



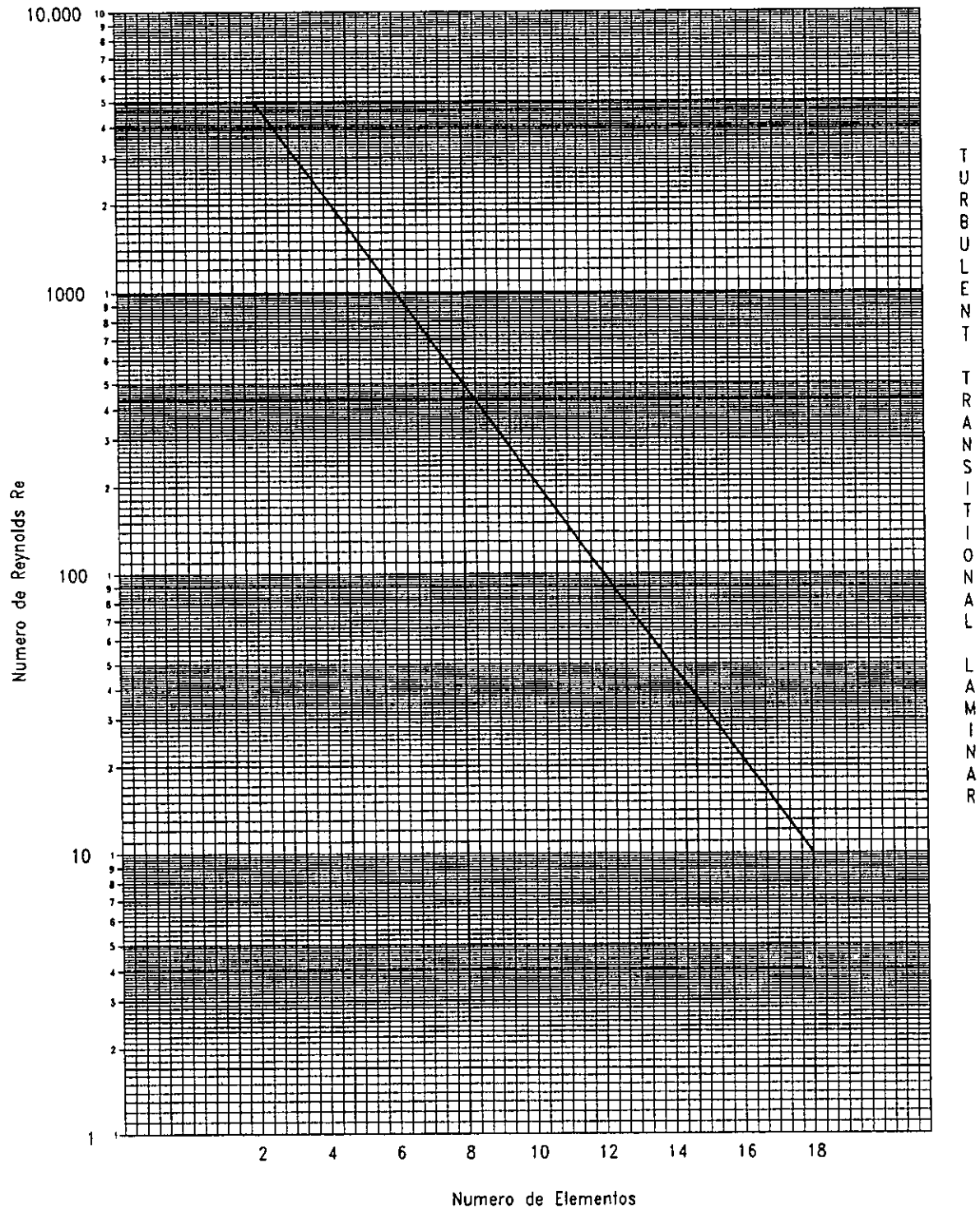


Figura 1.9 Gráfica para la selección del número de elementos del mezclador estático

También existen tablas hechas por los proveedores, en las que se proporciona el diámetro del mezclador estático y el número de elementos necesarios basados en la proporción de flujo y viscosidad (ver Tabla 1.2). Se ofrecen tres opciones, las cuales se muestran en la Tabla 1.1, de acuerdo a la máxima caída de presión que se permita.

OPCIÓN	CAÍDA DE PRESIÓN
A	$\leq 1$ psi
B	$\leq 5$ psi
C	$\leq 10$ psi

*Tabla 1.1*

Además de esta tabla, también se cuenta con otras en las que se puede entrar con la proporción de flujo de gas y con el diámetro del mezclador o con la caída de presión dependiendo las limitaciones que se tengan en el diseño (ver Tabla 1.3).

Cabe señalar que la Tabla 1.3 está basada en aire cuya densidad es  $0.076 \text{ lb/ft}^3$ , por tanto, para poder obtener resultados adecuados, se debe multiplicar el valor de la caída de presión de la tabla por la densidad del gas usado entre la densidad del aire.

Además si la proporción del flujo volumétrico de los fluidos es mayor que 1000 a 1, entonces se deben utilizar 3 elementos más y multiplicar la caída de presión por  $3/2$ , y si la proporción de la densidad de los fluidos es mayor de 5 a 1, se deben utilizar 4 elementos más y multiplicar la caída de presión por  $4/2$ .

Flujo (gpm)		Viscosidad (cps)										
		1	10	50	100	500	1000	3000	5000	10K	50K	100K
1	A	¼ x 6	¼ x 6	¼ x 6	¼ x 12	1 x 18	1.5 x 18	2 x 18	2.5 x 18	3 x 18	6 x 18	8 x 18
	B	-	-	-	¼ x 12	¼ x 18	1 x 18	1.5 x 18	1.5 x 18	2 x 18	3 x 18	4 x 18
	C	-	-	-	-	¼ x 12	¼ x 18	1 x 18	1 x 18	1.5 x 18	2.5 x 18	3 x 18
5	A	¼ x 6	¼ x 6	1 x 6	1.5 x 12	2 x 12	2.5 x 18	4 x 18	4 x 18	6 x 18	8 x 18	10 x 18
	B	¼ x 6	¼ x 6	¼ x 6	¼ x 6	1.5 x 12	1.5 x 18	2.4 x 18	3 x 18	3 x 18	6 x 18	8 x 18
	C	-	-	¼ x 6	¼ x 6	1 x 12	1 x 12	2 x 18	2 x 18	2.5 x 18	4 x 18	6 x 18
10	A	1.5 x 6	1.5 x 6	1.5 x 6	2 x 6	2.5 x 12	3 x 12	4 x 18	6 x 18	8 x 18	10 x 18	12 x 18
	B	1 x 6	1 x 6	1 x 6	1 x 6	1.5 x 12	2 x 12	3 x 18	3 x 18	4 x 18	6 x 18	10 x 18
	C	¼ x 6	¼ x 6	¼ x 6	¼ x 6	1 x 12	1.5 x 12	2.5 x 18	3 x 18	3 x 18	6 x 18	6 x 18
25	A	2 x 6	2 x 6	2 x 6	2.5 x 6	3 x 12	4 x 12	6 x 18	8 x 18	10 x 18	12 x 18	
	B	1.5 x 6	1.5 x 6	1.5 x 6	1.5 x 6	2 x 12	2.5 x 12	4 x 18	6 x 18	6 x 18	10 x 18	
	C	1 x 6	1 x 6	1 x 6	1 x 6	1.5 x 12	2 x 12	2.5 x 12	3 x 18	4 x 18	8 x 18	
50	A	2.5 x 4	2.5 x 4	2.5 x 4	3 x 6	4 x 12	6 x 12	8 x 18	10 x 18	12 x 18		
	B	2 x 6	2 x 6	2 x 6	2 x 6	2 x 6	3 x 12	4 x 12	6 x 18	8 x 18		
	C	1.5 x 6	1.5 x 6	1.5 x 6	1.5 x 6	2 x 6	2.5 x 12	3 x 12	4 x 18	6 x 18		
100	A	2.5 x 2	3 x 2	4 x 4	4 x 6	6 x 6	8 x 12	10 x 12	10 x 18	12 x 18		
	B	2.5 x 2	2.5 x 2	2.5 x 4	2.5 x 4	3 x 6	4 x 12	6 x 12	6 x 12	10 x 18		
	C	2 x 6	2 x 6	2 x 6	2 x 6	2.5 x 6	3 x 6	4 x 12	6 x 12	8 x 18		
200	A	4 x 2	4 x 2	6 x 4	6 x 4	6 x 6	8 x 12	10 x 12	12 x 12			
	B	3 x 2	3 x 2	4 x 4	4 x 4	4 x 6	6 x 6	8 x 12	8 x 12			
	C	2.5 x 2	2.5 x 2	2.5 x 2	3 x 4	3 x 4	4 x 6	6 x 12	6 x 12			
600	A	6 x 2	6 x 2	8 x 4	8 x 4	10 x 6	12 x 6					
	B	4 x 2	4 x 2	6 x 2	6 x 2	8 x 6	8 x 6					
	C	4 x 2	4 x 2	4 x 2	4 x 2	6 x 6	6 x 6					
1000	A	8 x 2	8 x 2	8 x 2	10 x 4	12 x 6						
	B	6 x 2	6 x 2	6 x 2	6 x 4	10 x 6						
	C	6 x 2	6 x 2	6 x 2	6 x 4	8 x 6						
2000	A	10 x 2	10 x 2	12 x 2	12 x 2							
	B	8 x 2	8 x 2	8 x 2	8 x 2							
	C	6 x 2	6 x 2	8 x 2	8 x 2							
4000	A	18 x 2	18 x 2	20 x 2								
	B	12 x 2	12 x 2	12 x 2								
	C	10 x 2	10 x 2	10 x 2								
6000	A	24 x 2	24 x 2									
	B	14 x 2	14 x 2									
	C	12 x 2	12 x 2									

Tabla 1.2 Diseño y selección del diámetro del mezclador estático

2"		4"		6"		8"	
ACFM	$\Delta P$	ACFM	$\Delta P$	ACFM	$\Delta P$	ACFM	$\Delta P$
100	0,23	100	0,01	500	0,06	500	0,01
200	0,94	200	0,05	1000	0,22	1000	0,07
300	2,14	300	0,11	1500	0,51	1500	0,15
400	3,85	400	0,19	2000	0,87	2000	0,26
500	6,08	5000	0,30	3000	2,00	3000	0,60
700	12,18	700	0,59	4000	3,60	4000	1,07
1000	25,51	1000	1,22	5000	5,70	5000	1,69
10"		12"		14"		16"	
ACFM	$\Delta P$	ACFM	$\Delta P$	ACFM	$\Delta P$	ACFM	$\Delta P$
1000	0,03	1000	0,01	3000	0,09	3000	0,04
2000	0,11	2000	0,05	5000	0,24	5000	0,09
3000	0,24	3000	0,10	8000	0,61	8000	0,24
5000	0,66	5000	0,29	10000	0,95	10000	0,37
8000	1,72	8000	0,74	15000	2,15	15000	0,83
10000	2,72	10000	1,17	20000	3,85	20000	1,47
15000	6,27	15000	2,69	30000	8,79	30000	3,33
24"		30"		36"		42"	
ACFM	$\Delta P$	ACFM	$\Delta P$	ACFM	$\Delta P$	ACFM	$\Delta P$
5000	0,38	15000	0,14	25000	0,19	25000	0,10
20000	0,65	20000	0,25	40000	0,25	40000	0,25
30000	1,50	30000	0,57	60000	1,06	60000	0,55
40000	2,69	40000	1,01	80000	1,89	80000	0,98
50000	4,22	50000	1,59	100000	2,97	100000	1,54
60000	6,12	60000	2,29	125000	4,66	125000	2,42
70000	8,38	70000	3,14	150000	6,72	150000	3,48

*Tabla 1.3 Caídas de presión*

La caída de presión que proporcionan las tablas y las gráficas mencionadas es sumamente importante, ya que esta la ocasiona el mezclador estático, que actúa como una resistencia a los fluidos que circulan a través de él. Esta caída de presión debe ser superada por la fuerza motriz de la bomba o por el compresor de gases para forzar a los fluidos a pasar a través del conducto, en caso de no superar esta caída de presión no será posible llevar a cabo la operación de mezclado.

La gráfica que se presenta en la figura 1.10, nos ayuda a conocer la caída de presión que ocasionará el mezclador estático. Dicha gráfica está basada en agua, cuya gravedad específica de 1 y viscosidad de 1 cp; a esta gráfica se puede entrar con el gasto del flujo en gpm y con el diámetro del mezclador, limitándonos la caída de presión que se pueda aceptar en el diseño, la caída de presión proporcionada por la gráfica esta en psi por elemento.

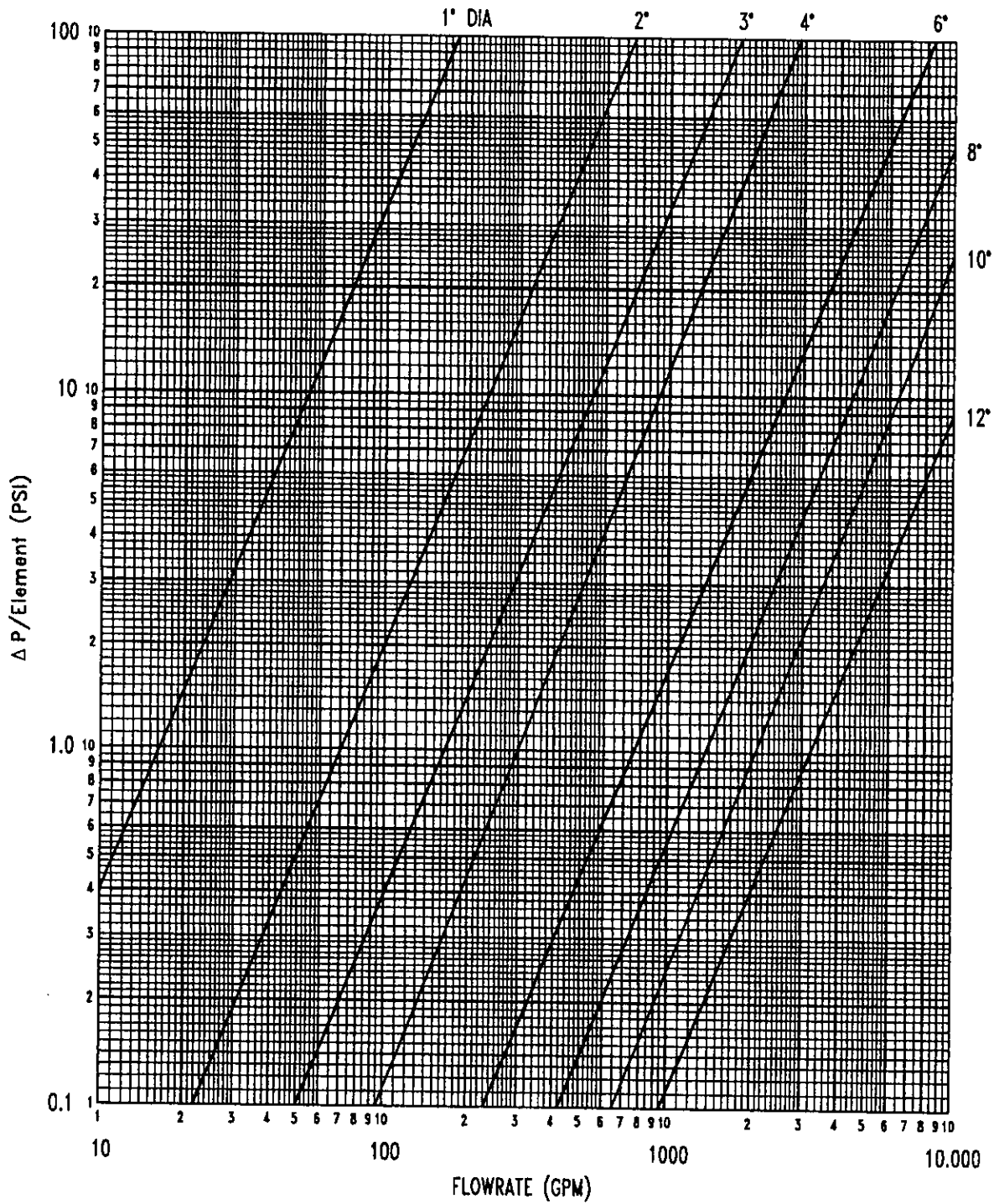


Figura 1.10 Caída de presión por elementos para varios diámetros del mezclador estático

Cuando se ocupa otro fluido diferente al del agua, se puede determinar de manera matemática la caída de presión, para lo cual se deben seguir los cuatro pasos descritos a continuación:

1) Obtener la caída de presión en la tubería vacía del mismo tamaño del mezclador estático:

$$\Delta P_{\text{tubería}} = \frac{(1.35 \times 10^{-2})(f \times L \times SG \times Q^2)}{D^5}$$

donde:

$\Delta P_{\text{tubería}}$  = Caída de presión en la tubería vacía (psi)  
 $f$  = Factor de fricción de Darcy (ver fFigura 1.11)  
 $L$  = Longitud de la tubería (m)  
 $D$  = Diámetro de la tubería (m)  
 $SG$  = Gravedad Especifica

2) Calcular el número de Reynolds

3) Caída de presión en el mezclador estático utilizando el coeficiente de flujo Cf.

El coeficiente de flujo es un factor calculado para compensar la caída de presión a través de los elementos del mezclador estático y se determina de la Tabla 1.4, que a continuación se muestra:

Número de Reynolds	Coficiente de flujo
Re < 10	Cf = 6
10 < Re < 1000	Cf = 1.53 Re <sup>0.45</sup>
Re > 1000	Cf = -15.9 + 8.41 ln Re

*Tabla 1.4 Valor del coeficiente de flujo*

4) Finalmente la caída de presión en el mezclador estático se obtiene como:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{tubería}} \cdot Cf$$

Donde:

$\Delta P$  = Caída de presión en el mezclador estático (psi)  
 $\Delta P_{\text{tubería}}$  = Caída de presión en la tubería vacía (psi)  
 $Cf$  = Coeficiente de flujo

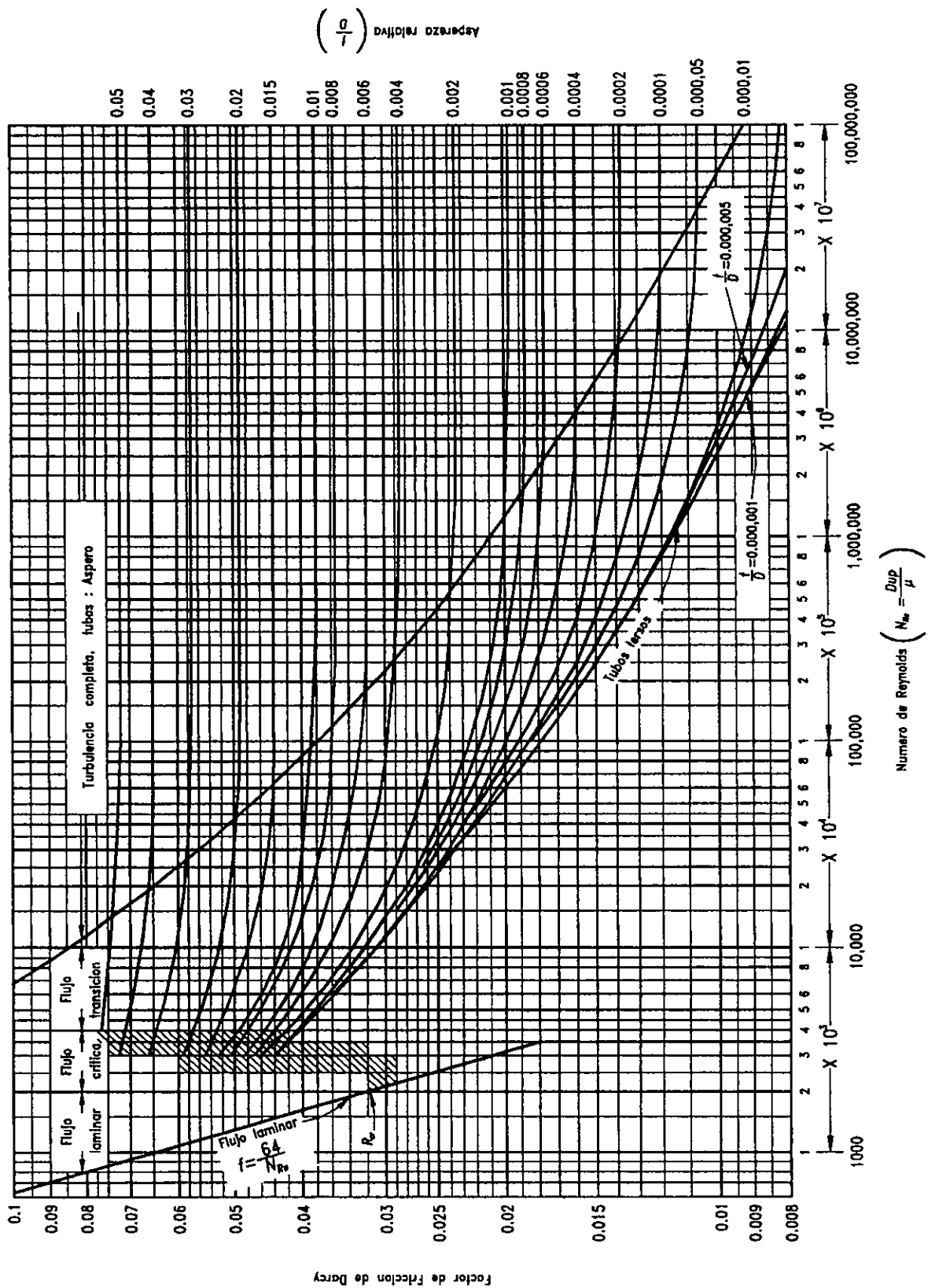


Figura 1.11 Factor de fricción de Darcy para tubería comercial



## TAMAÑO DE GOTA Y VELOCIDAD DEL FLUJO

Al igual que para la caída de presión, también existen otras gráficas que se emplean para estimar el tamaño de gota. En la gráfica que se muestra en la figura 1.12, el tamaño de gota está en función de la velocidad del flujo y del diámetro del mezclador. En procesos de dispersiones gas-líquido, la viscosidad del líquido debe ser menor a 10 cp para que el valor de la gráfica sea válido.

En caso de que la tensión superficial sea diferente a 80 dinas/cm, el tamaño de gota se calcula como[5]:

$$D=0.390*We^{-0.43}*\phi$$

donde:

D = Tamaño de gota (m)

We= Número de Weber

$\phi$  = Diámetro de la tubería (m)

También existen gráficas como la figura 1.13, con las que se puede obtener la velocidad lineal en función del mezclador y el flujo, pero la velocidad lineal no es uno de los parámetros más importantes para la selección de las características del mezclador, aunque en algunos procesos se necesita una velocidad mínima y es por esto que los fabricantes cuentan con estas gráficas, pero son poco usuales.

Generalmente se recomienda para flujo turbulento, que la velocidad del flujo sea mantenida como mínimo a 1 ft/s; para dispersiones se recomienda de 2.13-2.44 m/s (7-8 ft/s) y para aplicaciones de mezclado de 0.61-0.92 m/s (2-3 ft/s).

Los mezcladores estáticos han sido usados con gran éxito en los procesos de dispersión de líquido-líquido y gas-líquido y transferencia de masa en procesos continuos.

El tamaño de gota que se produce y la transferencia de masa se pueden calcular a partir de ecuaciones que se han realizado experimentalmente. Si en un mezclador estático se ponen en contacto fluidos que no se puedan mezclar, se formará una aglomeración de pequeñas gotas o burbujas, en caso de dispersiones gas-líquido y una gran superficie interfacial que se renueva continuamente.

El tamaño de gota es una función del suministro de energía, el tipo y número de elementos que componen el mezclador estático y las propiedades físicas de los fluidos ocupados.

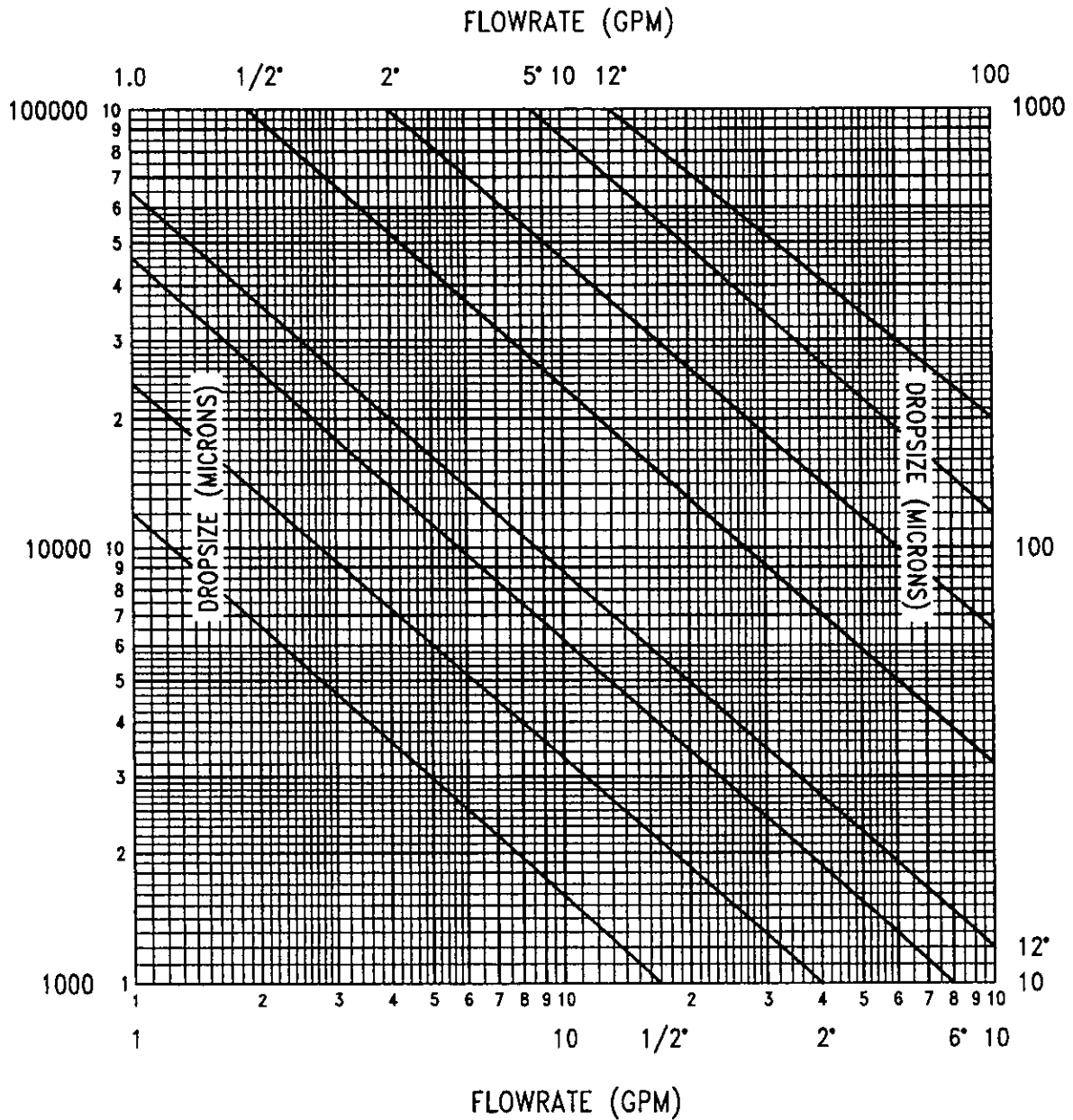


Figura 1.12 Determinación del tamaño de gota en una dispersión gas-líquido en función de la velocidad y diámetro del mezclador estático

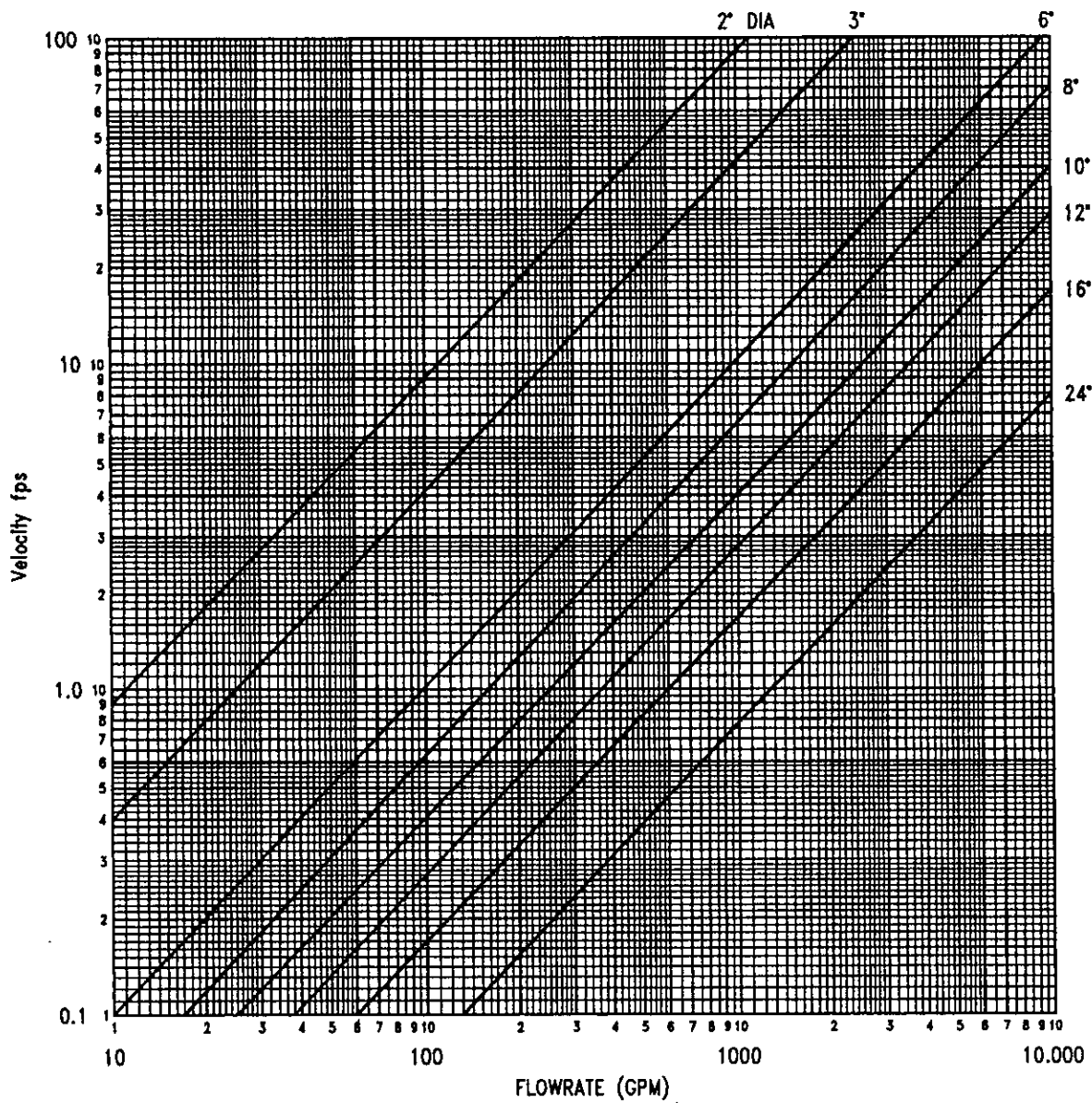


Figura 1.13 Determinación de la velocidad en función del flujo y diámetro del mezclador estático

#### **1.4.6 COMPARACIÓN ENTRE TANQUES AGITADOS MECANICAMENTE Y MEZCLADORES ESTÁTICOS EN GENERAL**

Como se mencionó con anterioridad, entre las ventajas que brinda el mezclador estático se encuentra su relativo bajo costo inicial así como bajos costos de operación y mantenimiento comparados con los tanques agitados mecánicamente debido a que sus elementos son inmóviles y no presentan gran desgaste; en cambio los tanques agitados mecánicamente se tienen que estar revisando periódicamente para checar los sellos mecánicos, la limpieza del aceite y todas aquellas partes que se puedan ir desgastando debido a la fricción.

Con base en los resultados experimentales se ha podido comprobar que es muy eficiente para el mezclado bifásico y la transferencia de masa, y presenta una buena dispersión de gas, pero también los mezcladores estáticos presentan ciertas limitaciones respecto a los tanques agitados mecánicamente.

A diferencia de los mezcladores estáticos, los tanques agitados mecánicamente pueden trabajar con cualquier régimen de flujo y son sumamente adaptables a cambios en el proceso, variando su tipo de impulsor, su velocidad de rotación, la altura a la cual se encuentran las paletas, etc., son propicios para las tareas de mezclado basadas en el uso de un impulsor y pueden realizar el mezclado de manera continua o por lotes. En la tabla 1.5, se presenta una comparación de las características de los tanques agitados mecánicamente y los mezcladores estáticos.

Los mezcladores estáticos basan su capacidad de mezclado en forzar al choque y dividir la corriente de flujo que pasa a través de ellos, propiciando una buena transferencia de masa con una caída de presión baja, misma que es vencida por la bomba que proporciona el impulso al flujo.

Esta bomba es la que deberá proporcionar la fuerza necesaria al fluido para vencer la resistencia de los elementos inmóviles del mezclador estático y superar la caída de presión.

Mientras el mezclador estático presente más elementos, la caída de presión será mayor, ya que el fluido tendrá que librar más obstáculos en su camino y se requerirá más energía por parte de la bomba, pero se llevará a cabo un mejor mezclado; si se disminuyen los elementos componentes del mezclador estático la caída de presión será menor y se requerirá menos fuerza motriz por parte de la bomba, pero el mezclado será menos eficiente, por lo que se necesita trabajar en un punto óptimo en el que se requiera la menor energía posible por parte de la bomba garantizando un buen mezclado.

Desde principios de los años 70's, los mezcladores estáticos han revolucionado la industria del mezclado. Han reemplazado a los tanques agitados con motores convencionales y han aumentado la eficiencia del mezclado mientras reducen costos. Un mezclador estático es un sistema que no requiere energía externa, poco mantenimiento, y ninguna atención del operador [21].

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>MEZCLADOR ESTÁTICO</b>	<b>TANQUES AGITADOS MECÁNICAMENTE</b>
Costo económico	Bajo	Alto
Costo de operación	Bajo	Alto
Tiempo de residencia	Bajo	Alto
Adaptación a cambios en el proceso	Un poco restringido	Muy adaptable
Potencial para taparse	Alto (particularmente si está sucio)	Bajo
Régimen del flujo	Flujo uniforme	Cualquier tipo de flujo
Aplicaciones	Muy bueno para mezclado y transferencia de masa. Bueno para dispersión de gas. debe ser un flujo continuo	Excelente para aplicaciones basadas en el uso de impulsor; puede ser continuo o por lotes
Mantenimiento	Bajo: Los elementos no sufren desgaste	Necesita ser revisado regularmente (revisar engranajes, selladores, aceite, soportes, etc.)

*Tabla 1.5 Comparación general entre tanques agitados mecánicamente y mezcladores estáticos*

En resumen los mezcladores estáticos propician altamente el mezclado y la dispersión; consumen del 50 al 90% menos energía que los tanques agitados mecánicamente; proporcionan más seguridad y limpieza en la operación de mezclado, presentan resistencia a la corrosión y abrasión, son excelentes para mezclar fluidos con diferencias de viscosidades altas y manejan fluidos con viscosidades hasta de  $10^6$  cp. millón de centipoises.

#### **1.4.7 SISTEMAS BIFÁSICOS (gas-líquido)**

En los procesos industriales a menudo se encuentran operaciones en las que se presenta el contacto gas-líquido, ya sea absorbiendo gas en el líquido, humidificando un chorro de gas, separando gas de líquido, etc.

Los sistemas de contacto gas-líquido, se usan generalmente cuando se requiere la transferencia de calor, la transferencia de masa y la cantidad de movimiento entre las fases limitado por el equilibrio físico y químico. Los equipos que se emplean en sistemas bifásicos, en general basan su diseño en que el equipo realice las operaciones requeridas de transferencia con un consumo mínimo de energía y bajos costos de inversión.

Durante un proceso de mezclado, el objetivo primordial es la transferencia de masa, los equipos utilizados para este proceso se dividen, de acuerdo al tipo de flujo de la corriente, en:

- A contracorriente
- A corriente paralela
- Con flujo cruzado

Los equipos que se utilizan para ocasionar el contacto gas-líquido, presentan diferentes prioridades en las características de su diseño, dependiendo de las operaciones que se vayan a desarrollar, por ejemplo en el caso de fermentaciones, en las que las reacciones son lentas y se usan tanque agitados mecánicamente, la eficiencia en el consumo de energía es más importante que la transferencia de masa. En el caso de clorinación y sulfonación, en las que las reacciones son rápidas, lo más importante es la transferencia de masa y de calor, en cambio, en los alimentos como mantequilla y crema, las limitaciones reológicas y la temperatura son primordiales [21].

#### **MÉTODOS DE DISPERSIÓN DE GAS**

La dispersión de un gas en un líquido se puede llevar a cabo de las siguientes formas:

- Introduciendo burbujas de gas de un tamaño deseado hasta llegar al líquido
- Vaporizando un líquido volátil
- Por medio de una reacción química
- Desintegrando una burbuja o corriente de gas por medio de la turbulencia del líquido

# CAPITULO 2

## **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### Tubería y accesorios

Con el fin de disminuir las pérdidas por fricción se empleó tubería de PVC de 2.54 cm (1") de diámetro; de este mismo material son los accesorios de la tubería (codos, tees, válvulas, etc.). Asimismo el equipo cuenta con válvulas de compuerta colocadas de tal manera que es posible tomar muestras de la mezcla y así poder analizarla y en caso necesario también poder recircularla, tal como lo muestra el diagrama del sistema ( Figura 2.2) y la fotografía del sistema construido (Figura 2.3).

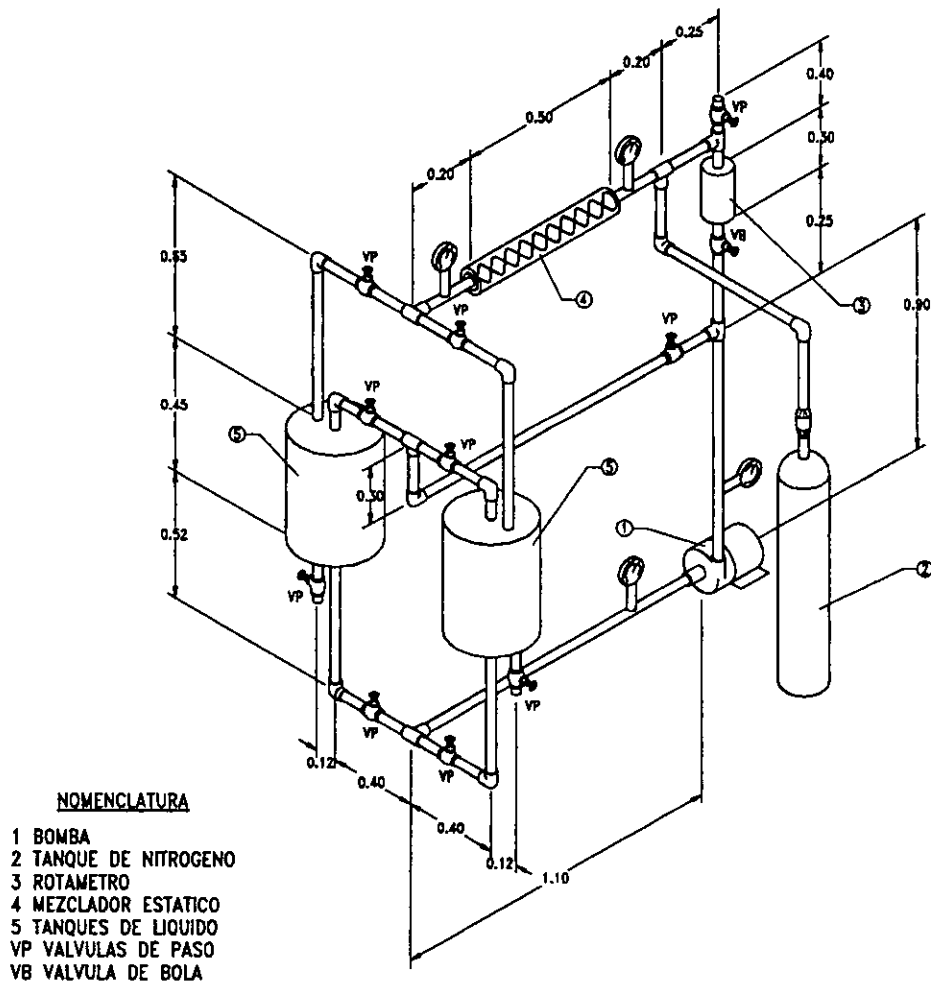


Figura 2.2 Diagrama experimental del mezclador estático (dimensiones en m.)

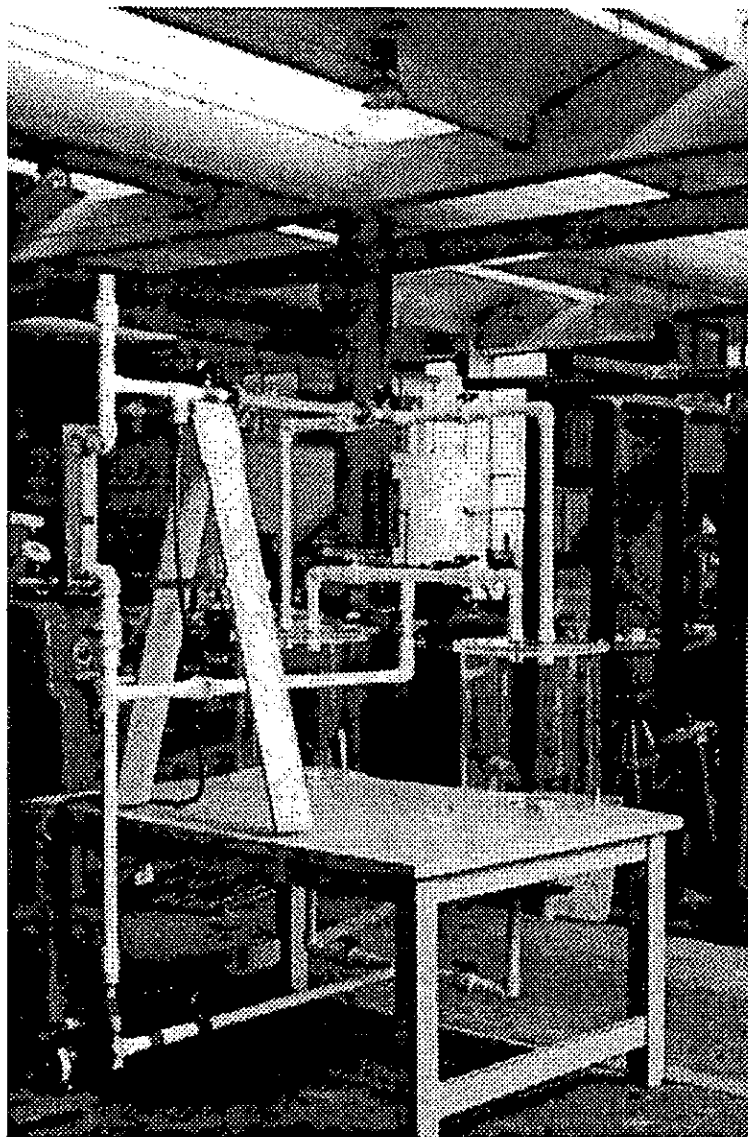


Los accesorios utilizados en el sistema se describen en la siguiente tabla:

Cantidad	Tipo de accesorios	Capacidad
2	Tanques de 48 L	0.48m <sup>3</sup>
4	Manómetros	0-10 psi
1	Rotámetros	0.0045-0.0378 m <sup>3</sup> /min.
11	Válvulas de globo	1" NPT
8	Codos de 90°	1" NPT
9	"tees"	1" NPT
1	Difusor	3 mm.
1	Medidor de oxígeno	19 mm.
1	Reducciones de Bushing	12.7 mm.-25.4 mm.

*Tabla 2.2 Accesorios del sistema de mezclado*

El difusor es un accesorio empleado para introducir un flujo de gas en forma de pequeñas burbujas en un líquido, con base en los requerimientos del flujo de gas y el diámetro y espesor de la tubería. Se propuso un orificio de 3mm de diámetro colocándolo antes de la entrada del fluido al mezclador estático.



*Figura 2.3 Sistema de mezclado construido*

### **Instrumentación**

Para realizar la medición del volumen de líquido circulante, se colocó un rotámetro con un rango de 0-38 L/min. inmediatamente después de la bomba, la cual tiene una capacidad de 64 L/min. (16.3 gpm) y una columna de 8.23m. (27 pies). El flujo de nitrógeno se determina mediante otro rotámetro 0-100 L/s. La caída de presión en el mezclador estático se determina mediante un par de manómetros de Bourdon de 0-105 kPa (0-15 psi), colocados antes y después de la bomba y del mezclador estático. También se empleó un electrodo de oxígeno disuelto colocado dentro de uno de los tanques, el cual envía una señal eléctrica en

volts y posteriormente se amplifica la señal y se introduce a un paquete de cómputo para obtener los resultados finales de la presencia de oxígeno en la mezcla.

Se ocupó un electrodo para medir oxígeno disuelto Ingold Modelo 322756702, con la finalidad de medir la desorción de oxígeno desplazado por el gas inerte (nitrógeno) a través de la tubería. El electrodo se conectó a un amplificador Cole Parmer Modelo 01972-00 el cual registra la señal obtenida del medidor de oxígeno. El amplificador a su vez se encuentra conectado a una interfase (Data Logger) ECO Modelo 5100 Logger-Lab. La interfase permite percibir la señal del amplificador y enlazarla a una computadora personal (LAPTOP IBM THINKPAD), para obtener las gráficas de resultados (señal vs tiempo) en el paquete de la interfase.

También se utilizó un rotámetro digital McMillan Co. 300/310 Flo-Meter, para medir el caudal del gas (nitrógeno).

### **Mezclador estático**

Debido a sus características descritas en la bibliografía y en capítulos anteriores, el mezclador estático utilizado es del tipo Kenics. Este diseño consiste de una serie de elementos de mezclado desmontables, para que el mezclador estático pueda variar el número de elementos y con esto su eficiencia de mezclado, estos elementos están alineados a 90 grados. Cada elemento es una pequeña hélice torcida 180 grados; se ocupan dos hélices diferentes en su giro, una girada a mano derecha y otra a mano izquierda y se van intercalando al introducirse alternativamente dentro del conducto, provocando de esta forma que el choque del fluido con las burbujas del gas sea más frecuente.

El diámetro de los elementos se determinó por medio de la revisión bibliográfica y considerando tubería estándar de 25.4mm (1"), y la cantidad de elementos, se determinó con base en el número de Reynolds ( $Re=251.08$ ).

Con el número de Reynolds obtenido se determinó que sería conveniente utilizar 18 elementos, ya que en la literatura se menciona que entre mayor sea el número de elementos, mayor es el tiempo de residencia y el choque del fluido, por lo que es mayor la transferencia de masa gas-líquido.

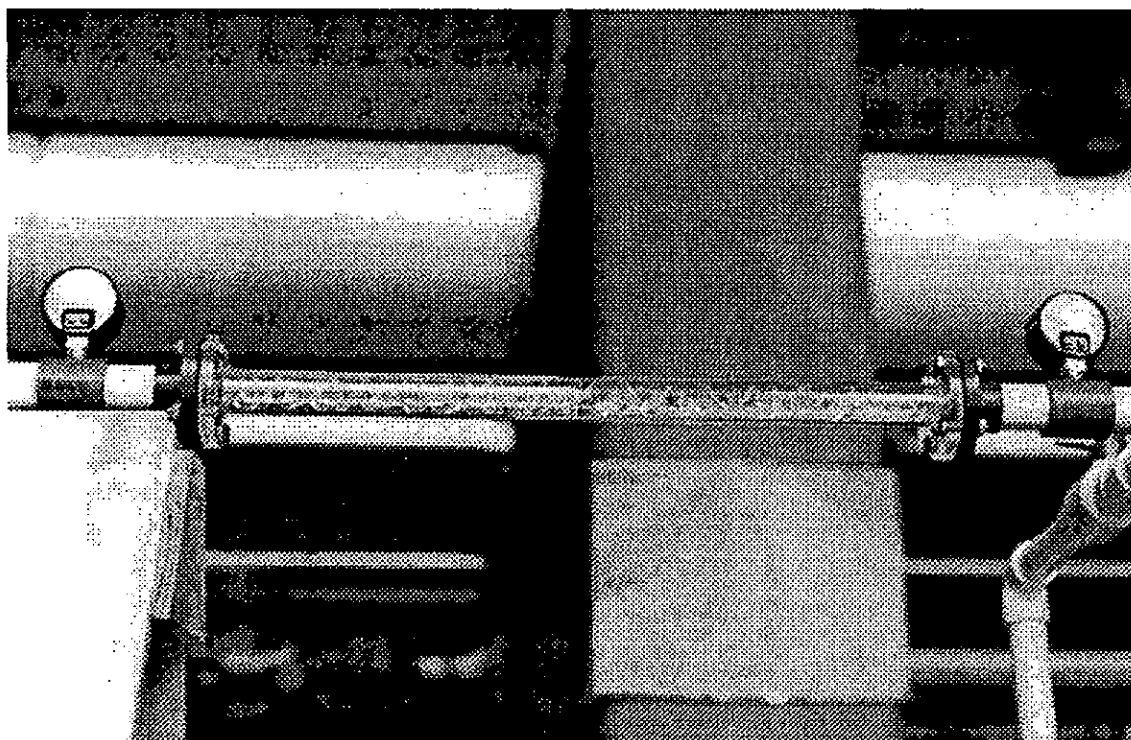
El mezclador consta de 18 elementos, cada uno de 2.54cm de diámetro y 2.54cm de longitud; el material del que se construyeron estos elementos del mezclador es acrílico transparente de 3mm de espesor, ya que experimentalmente se determinó que era el espesor más adecuado para conseguir su forma helicoidal. El conducto que contiene los elementos, es del mismo material (como lo muestra la Figura 2.4), lo cual nos proporciona la ventaja de poder observar directamente como se comporta el fluido dentro del conducto y la manera como se va llevando a cabo el mezclado. Las dimensiones de este conducto son 2.54cm de diámetro y 50cm de longitud.

Con respecto a la posición del mezclador se decidió que fuese horizontal, porque se supone que en esta posición es mayor el tiempo de residencia del gas en el líquido que en una posición vertical, y lo que se requiere es obtener una mayor transferencia de masa para la desorción de oxígeno.

Debido a todo lo anterior las características del mezclador estático utilizado están descritas en la Tabla 2.3.

Características del mezclador estático	Especificaciones
Diámetro	0.0254m (1")
Longitud	0.508m (20")
Numero de elementos	18
Geometría	Helicoidal (Tipo Kenics)
Posición	Horizontal
Material	Acrílico transparente de 3mm de espesor

*Tabla 2.3 Características del mezclador estatico*



*Figura 2.4 mezclador estático construido*

## 2.4 CONDICIONES EXPERIMENTALES

PARÁMETROS	CONDICIONES EXPERIMENTALES
Componentes que serán mezclados	Nitrógeno+aceite comestible
La tasa de flujo de cada componente, m <sup>3</sup> /s	Aceite=1.26 E-4 y 2.52 E-4
Diámetro interno de la tubería, m	1" NPT
Viscosidad de cada componente, Mpas	56
Máxima caída de presión, psi	1 psi
Peso específico, SG	0.935
Temperatura y presión de operación	ambientes
Materiales de construcción	acrílico
Tipo de mezclador estático y conexiones	Kenics
Cualquier requerimiento especial	

*Tabla 2.4 Condiciones experimentales de operación*

El equipo descrito en este trabajo fue caracterizado haciendo circular aceite comestible en su fase líquida y nitrógeno gaseoso con diferentes gastos volumétricos, con el fin de analizar la fracción de saturación de oxígeno como una función de tiempo.

No. de prueba	Caudal del líquido (Q <sub>L</sub> ) (m <sup>3</sup> /s)	Caudal del gas (Q <sub>G</sub> ) (m <sup>3</sup> /s)
1	1.26×10 <sup>-4</sup> (2 gpm)	1.33×10 <sup>-5</sup> (0.8 L/min)
2	1.26×10 <sup>-4</sup> (2 gpm)	2.66×10 <sup>-5</sup> (1.6 L/min)
3	2.53×10 <sup>-4</sup> (4 gpm)	1.33×10 <sup>-5</sup> (0.8 L/min)
4	2.53×10 <sup>-4</sup> (4 gpm)	2.66×10 <sup>-5</sup> (1.6 L/min)

Q<sub>L</sub> = Caudal volumétrico del fluido (aceite de Girasol Marca 123)

Q<sub>G</sub> = Caudal de gas (nitrógeno)

*Tabla 2.5 Condiciones de caudal en las pruebas realizadas*

Se realizaron cuatro experimentos por triplicado, obteniendo una gráfica por número de prueba. Se escogieron las gráficas significativas para la determinación del coeficiente de transferencia de masa. Para poder tener confiabilidad en los resultados, se realizaron las pruebas por triplicado y se determinó la media y la desviación estándar.

Se eligió en forma aleatoria aceite de girasol marca 123, cuya densidad se midió por medio de un picnómetro, realizando la medición tres veces y obteniendo un promedio. De igual forma se realizó la medición de la viscosidad utilizando un reómetro (HAAKE CUZON con geometría de cono y placa; diámetro 19.87mm con ángulo de 4°).

Propiedad del aceite de girasol (marca 123)	Teórico	Experimental
Densidad	920 kg/m <sup>3</sup>	935 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	0.066 Pa·s	0.0566 Pa·s

*Tabla 2.6 Propiedades del aceite comestible empleado en las pruebas*

El resultado experimental es similar al reportado teóricamente en la literatura, dando confiabilidad a los resultados obtenidos, los cuales se tomaron en cuenta para la determinación del número de Reynolds [21].

## **2.5 DETERMINACION DEL COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE TRANSFERENCIA DE MASA**

La selección de las gráficas se realizó escogiendo aquellas que presentaran la mayor linealidad en la regresión lineal.

En las gráficas elegidas se obtuvo la pendiente por medio de la resolución de la ecuación que se presenta a continuación, que es igual al coeficiente de transferencia de masa ( $K_L a$ ), determinándolo para cada prueba.

$$\ln_-(C^* - C) = -K_L a + \text{Constante}$$

El coeficiente volumétrico de transferencia de masa ( $K_L a$ ), es una cantidad fundamental de ingeniería para medir y caracterizar la capacidad de transferencia de oxígeno de reactores gas-líquido. Los valores de ( $K_L a$ ) tienen un significado físico ( $a$ = área geométrica de las burbujas de gas en la dispersión y  $K_L$ = es el coeficiente de transferencia de masa).

El método más simple es el método dinámico para determinar ( $K_L a$ ). La técnica implica bajar la concentración de oxígeno disuelto, usualmente por una concentración de oxígeno. La nitrogenación comienza y la concentración de oxígeno disuelto es seguida por un electrodo de oxígeno. Durante la nitrogenación, el nitrógeno diluye al oxígeno y es desplazado a una tasa dependiente del tiempo de residencia del gas.

La lectura del instrumento es proporcional al flujo de oxígeno. Una resistencia al oxígeno puede ocurrir en cualquiera de las siguientes regiones: la película del líquido antes de la membrana, la membrana, el electrolito y el cátodo.

# **CAPITULO 3**

## **RESULTADOS**

### 3.1 RESULTADOS

Los resultados de las pruebas realizadas expuestas en el capítulo anterior se presentan en la siguiente tabla.

No. de prueba	m <sup>3</sup> por prueba	Q <sub>G</sub> (m <sup>3</sup> /s.)	Q <sub>L</sub> (m <sup>3</sup> /s.)	Re	K <sub>La</sub> (s <sup>-1</sup> )	Media (x)	Desviación estándar (σ)
1	0.008	1.33×10 <sup>-5</sup>	1.26×10 <sup>-4</sup>	105.41	0.0141	0.0310	0.0223
2		(0.8 L/min)	(2 gpm)		0.0564		
3					0.0226		
4	0.008	2.66×10 <sup>-5</sup>	1.26×10 <sup>-4</sup>	105.41	0.0270	0.0246	0.0025
5		(1.6 L/min)	(2 gpm)		0.0250		
6					0.0220		
7	0.016	1.33×10 <sup>-5</sup>	2.53×10 <sup>-4</sup>	251.08	0.0131	0.0196	0.0100
8		(0.8 L/min)	(4 gpm)		0.0146		
9					0.0313		
10	0.016	2.66×10 <sup>-5</sup>	2.53×10 <sup>-4</sup>	251.08	0.0264	0.0232	0.0034
11		(1.6 L/min)	(4 gpm)		0.0238		
12					0.0196		

*Tabla 3.1 Resultados de las pruebas realizadas, Caída de presión (ΔP=0.5 psi)*

En la Figura 3.1(gráfica de la prueba No. 11) , se presentan tres zonas:

1. Zona transitoria
2. Zona experimental
3. Zona constante

En la zona transitoria, se presenta un estado constante debido a que la inyección de nitrógeno se realiza en el mezclador estático, y el medidor de oxígeno se encuentra dentro del tanque, por lo que transcurre un tiempo en que el aceite con el nitrógeno llegue al tanque y se registre la lectura.

En la zona experimental, es donde se lleva a cabo la mayor desorción de oxígeno.

En la zona constante, es donde se llega a una saturación con nitrógeno, ya no permitiendo una mayor desorción de oxígeno.



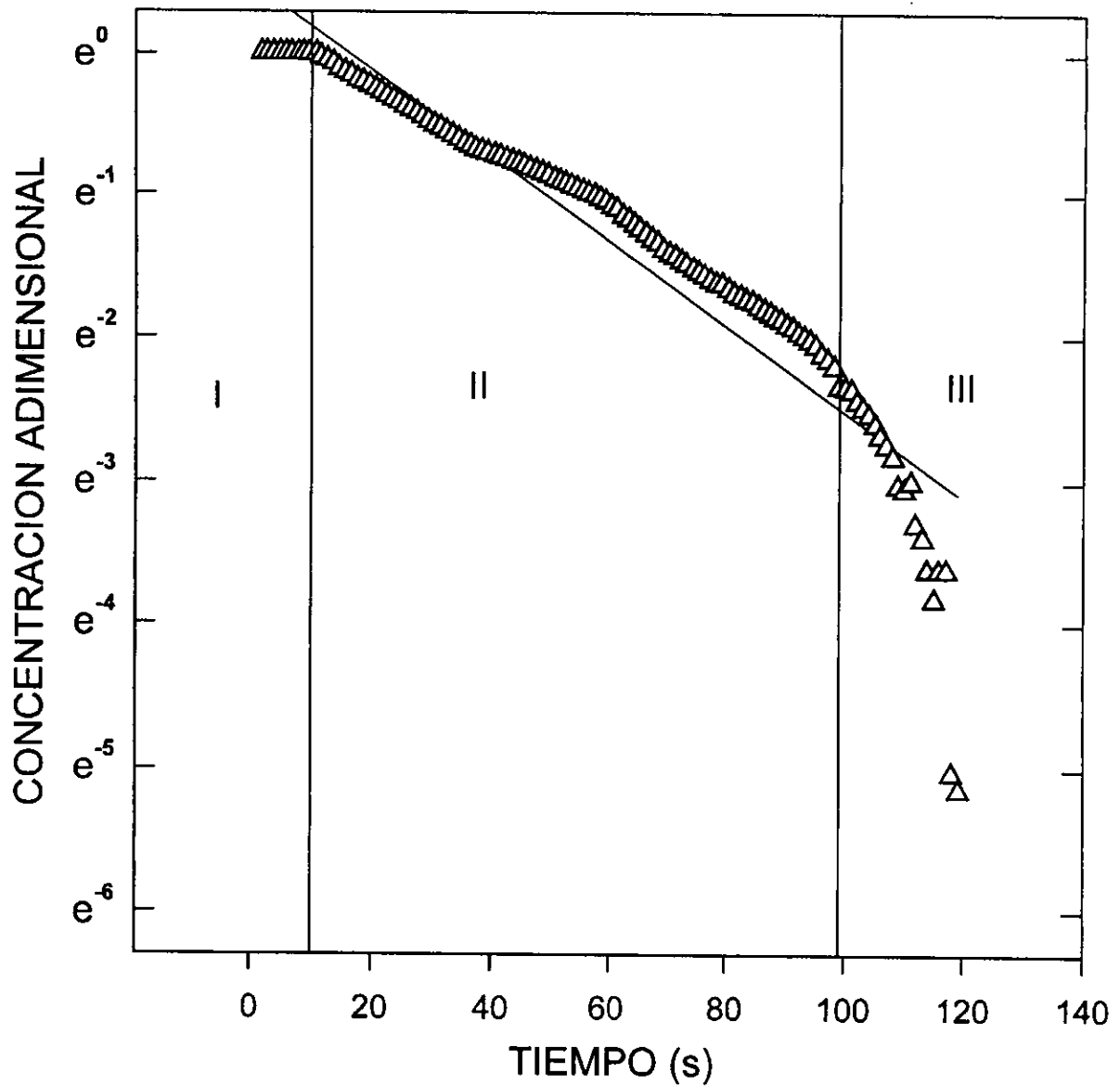


Figura 3.1 gráfica de la prueba No.11

Se puede observar en la tabla 3.1 que a bajos caudales del líquido se presenta una mayor transferencia de masa. A menor inyección de gas, la transferencia de masa es menor.

Cuando se manejan mayores caudales de gas se presenta un valor mayor de  $(K_L a)$ , conforme a lo reportado en la literatura. Sin embargo, también observamos que dichos valores no presentan una diferencia notable en cuanto al caudal del líquido. Es decir, cuando se manejó un caudal de gas de  $2.66 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  con caudales de líquido de  $1.26 \times 10^{-4}$  y  $2.53 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , la diferencia en el valor del coeficiente volumétrico de transferencia de masa  $(K_L a)$  no fue significativa.

Se observó en el tanque receptor un cambio de coloración de amarillo ámbar a claro, esto debido a que el aceite comestible llegó a su saturación, es decir, que la transferencia de masa pasa a la zona constante donde la desorción de oxígeno es mínima.

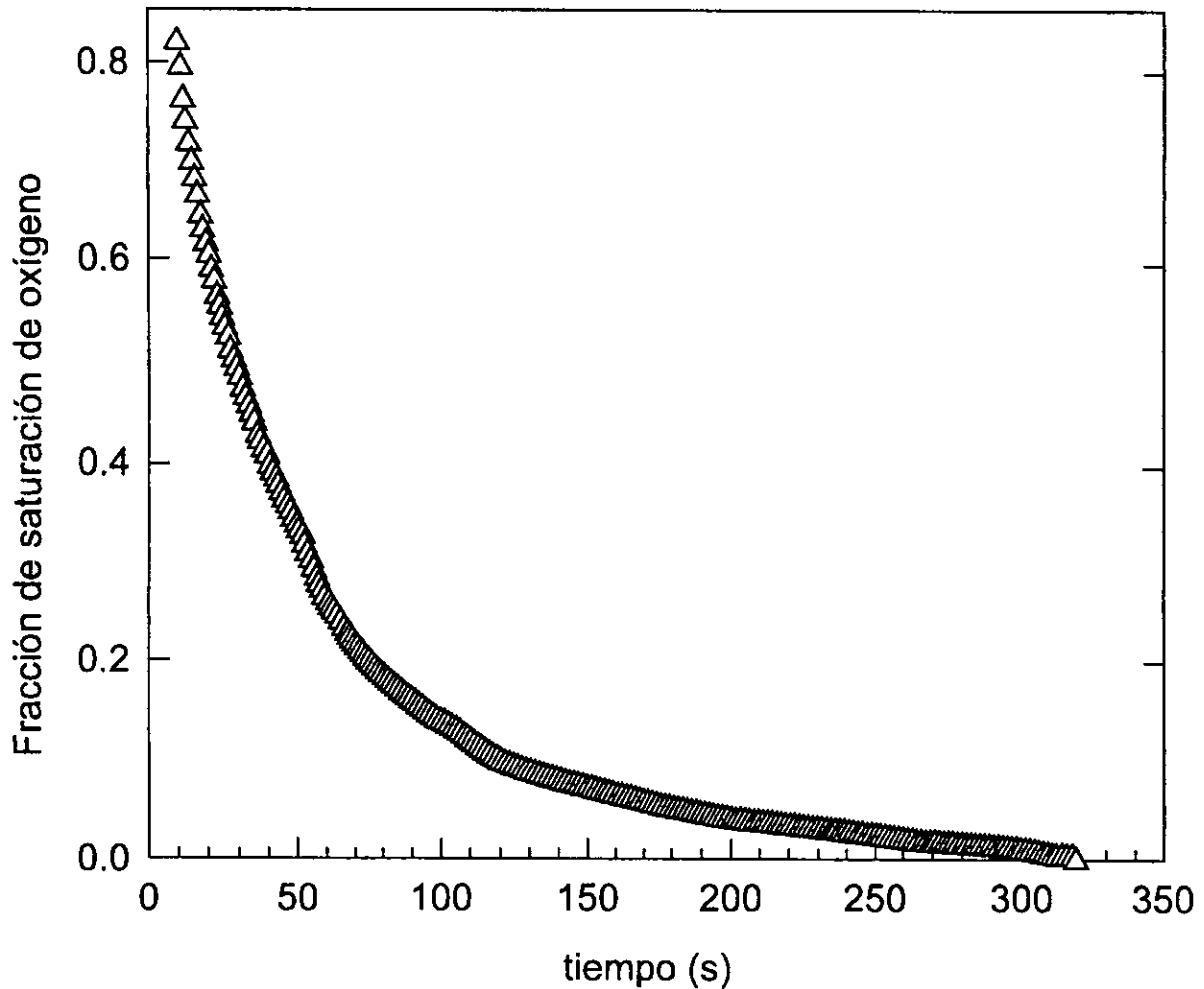
En las pruebas de las gráficas número 1,6, 9, y 11, se realizó una regresión lineal de los datos obtenidos ya habiendo procesado la señal por medio del método dinámico en un tiempo promedio de 181.5 segundos, lo cual nos indica que en este tiempo se llevó a cabo la transferencia de masa experimentalmente, no se puede tener una comparación con la literatura, ya que los experimentos que se realizan son con volúmenes de aproximadamente un 90% mayores a los resultados obtenidos en nuestra experimentación.

El tiempo experimental se tomó en cuenta con respecto a la zona experimental, debido a que es en esta zona donde se lleva a cabo la mayor desorción de oxígeno. En la zona transitoria el electrodo detecta la señal en un tiempo posterior a la inyección de nitrógeno, ya que dicho electrodo se encuentra en el tanque dos y no en el mezclador estático; se considera un tiempo perdido en la experimentación. La zona constante no se considera porque la desorción de oxígeno es mínima. Este tiempo de la zona experimental es variable en nuestro experimento debido a que cada prueba no se efectuó en el mismo tiempo.

Con respecto a los datos obtenidos en las pruebas 1, 2 y 3, manejando un caudal de gas de  $1.26 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  y un caudal de aceite de  $1.33 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ , utilizando 18 elementos, la media obtenida del valor de  $K_{La}$  es 0.0310, lo cual nos indica que en dichas condiciones se lleva una mayor transferencia de masa y por lo tanto una mejor eficiencia en el equipo.

Se consideró la caída de presión en el mezclador estático a través de los manómetros que se colocaron en los extremos del mezclador estático, resultando ésta de 0.5 psi.

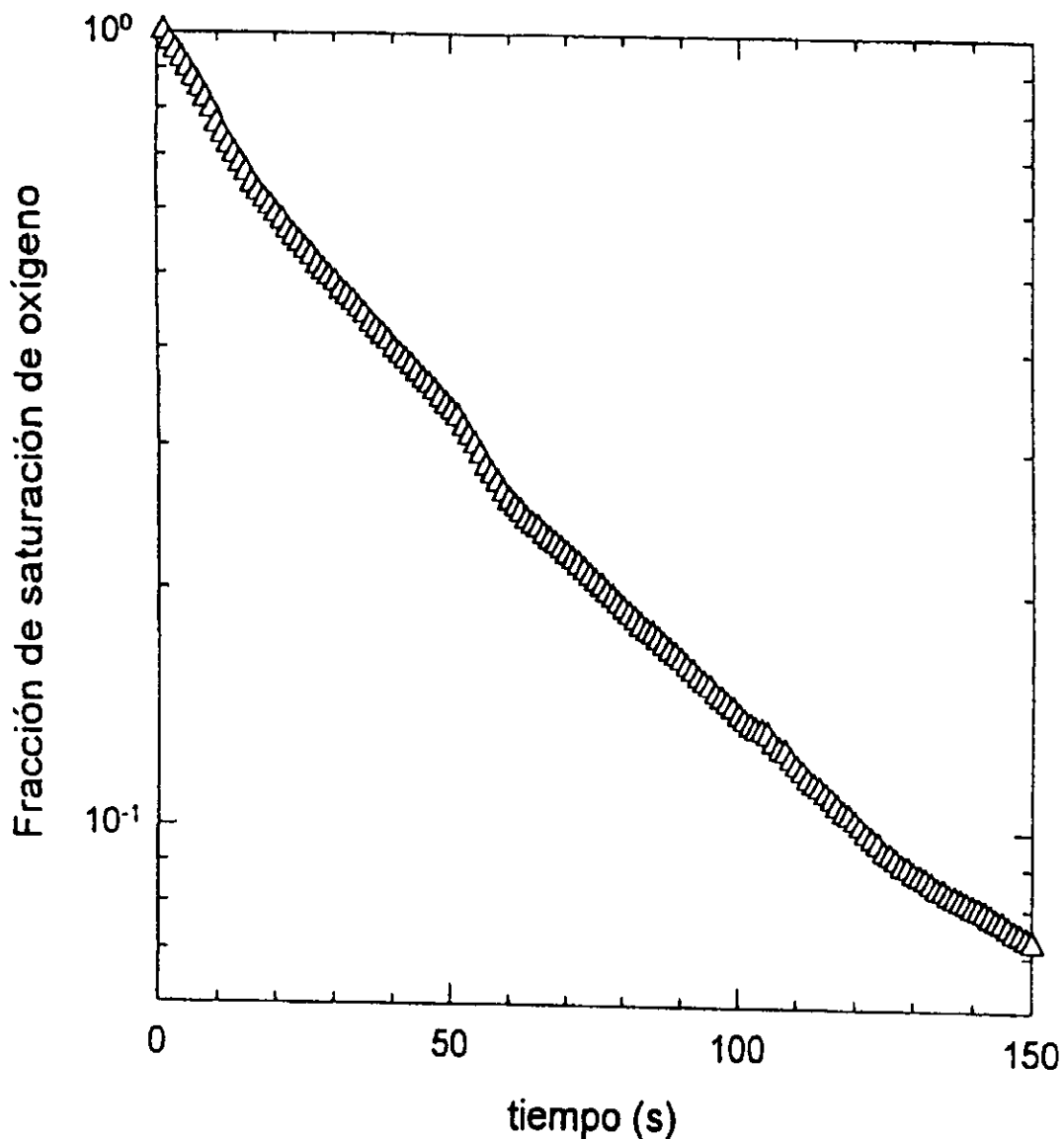
La figura 3.2 muestra la respuesta típica de la fase líquida obtenida para un caudal de nitrógeno de 0.8 L/min. y un caudal de aceite comestible de 7.5 L/min. (2 gpm). En las ordenadas se representa la concentración de oxígeno disuelto y el tiempo en que se alcanzó una concentración constante cercana a cero, los cuales dependieron de las condiciones de cada prueba, particularmente de los caudales de nitrógeno y aceite.



*Figura 3.2 Desorción de oxígeno con el tiempo en el mezclador estático. Caudal de nitrógeno = 0.8 L/min., caudal de aceite 7.5 L/min. (2 gpm).*

A partir de respuestas como las mostradas en el figura 3.6, se obtuvo el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno, el cual es una forma de expresar la eficiencia de intercambio gas-líquido que ocurre en un sistema de dos fases.

La figura 3.3 muestra la relación entre las variables cuando las ordenadas se grafican en una escala logarítmica. La relación es aproximadamente lineal y a partir de la pendiente de la recta se obtiene el coeficiente interfacial mencionado anteriormente de acuerdo con el análisis clásico de transferencia de masa.



*Figura 3.3 Representación semilogarítmica de la desorción de oxígeno con el tiempo. (mismas condiciones que en la figura 3.2).*

Las condiciones más favorables para la desorción de oxígeno de la fase líquida correspondieron a un caudal de nitrógeno de 0.8 L/min y un flujo de líquido de 7.5 L/min (2 gpm); el coeficiente interfacial fue el mayor de todos. En general los coeficientes obtenidos con el mezclado estático son comparables con los observados normalmente en tanques agitados para fluidos de viscosidad similar a la del aceite comestible (56.61 mPa·s a 25 °C). Sin embargo, según se observa en la figura 3.2, el tiempo de desorción en el caso del mezclador estático es mucho más rápido; más del 80% del oxígeno se ha absorbido en aproximadamente 100 segundos y más de 90% en alrededor de 150 segundos.

Para un caudal de gas de 0.8 L/min. al duplicar el caudal de líquido el coeficiente interfacial de transferencia de oxígeno disminuyó alrededor de 58%. Este mismo comportamiento se observa para un caudal de gas de 1.6 L/min. Sin embargo, para estas condiciones el coeficiente interfacial disminuye sólo 9.5%. Esto se explica por el hecho de que el tiempo de contacto entre el gas y el líquido es menor al aumentar el caudal de este último, es decir, al aumentar la velocidad promedio del aceite. Aunque no se hicieron mediciones de tamaño de burbuja de gas, es de esperarse que mientras más alto es el caudal de líquido, menos dispersión de gas ocurre en el mezclador ya que las burbujas son “arrastradas” por el líquido teniendo así menos tiempo de contacto con los elementos helicoidales del mezclador.

Cuando se comparan los datos en términos de un caudal de líquido constante surgen situaciones que a primera vista parecen contradictorias. Por ejemplo, para un caudal de líquido de 7.5 L/min. al duplicar el caudal de gas el coeficiente interfacial disminuyó 22%. Por el contrario, para un caudal de líquido de 15.0 L/min. al duplicar el caudal de gas el coeficiente interfacial aumentó 18%. Estos resultados sugieren que podría existir una combinación caudal de gas/caudal de líquido para la cual un aumento en el primero ya no tiene un efecto favorable sobre la transferencia al aumentar el caudal de gas. Sin embargo, es necesario ampliar el intervalo de condiciones para aclarar esta situación.

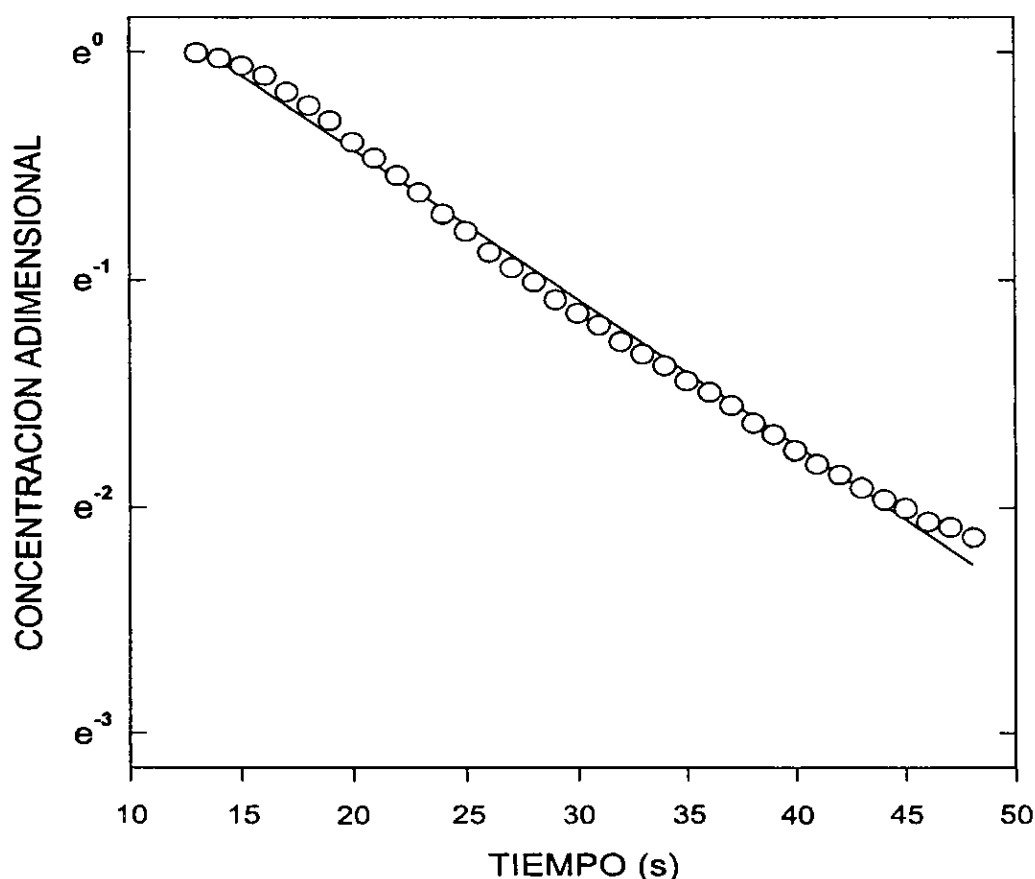
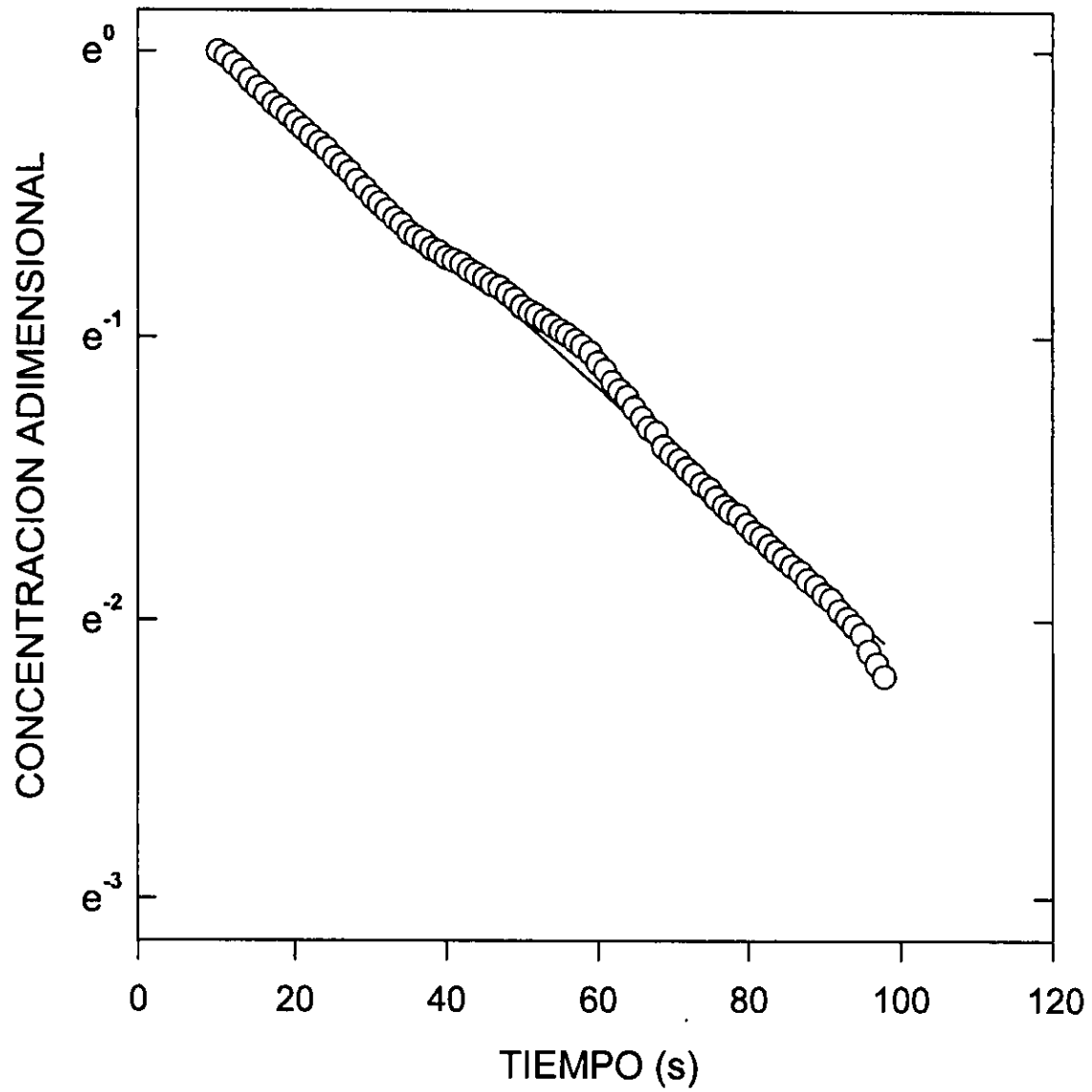


Figura 3.4 Regresión para obtener  $K_a$  (Gráfica de la prueba No.9)



*Figura 3.5 Regresión para obtener  $K_a$  (Gráfica de la prueba No.11)*

# **CAPITULO 4**

## **CONCLUSIONES**

## **4.1 CONCLUSIONES**

- a) El arreglo de válvulas resultó eficiente para la recirculación y separación de los fluidos.
- b) A pesar de la escasa literatura que existe, es posible realizar un buen diseño de un mezclador estático gracias a las pruebas experimentales que se han realizado hasta ahora.
- c) Experimentando se comprobó que la mejor opción se presenta al emplear un caudal de gas del 10% del caudal del líquido; aumentando la proporción del gas con respecto al líquido se llega a una saturación precipitada.
- d) El coeficiente de película volumétrico depende tanto de la tasa de flujo del nitrógeno como del tiempo de residencia a la transferencia de masa.
- e) La resistencia a la transferencia de masa está determinada por el grosor de la película, la cual a su vez está en función de la cantidad de turbulencia. La turbulencia está determinada por la cantidad de agitación.
- f) El sistema diseñado ha mostrado ser útil en la desorción de oxígeno de aceite comestible. Los coeficientes interfaciales dependen del caudal de líquido y del caudal de gas. Altos caudales de líquido no parecen favorecer la transferencia debido al menor tiempo de contacto con el gas. Bajos caudales de líquido y de gas, parecen ser más convenientes para obtener coeficientes interfaciales más grandes.



## 4.2 RECOMENDACIONES

- Controlar el flujo de gas a la entrada del mezclador estático y mantener la misma concentración de oxígeno del aceite comestible antes de la nitrogenación.
- Considerar el mismo tiempo de experimentación, para no tener una variable más a considerar, debido a que en las gráficas de resultados se observa la variación.
- Para poder recircular el fluido en el sistema es necesario tomar en cuenta las concentraciones iniciales de oxígeno en el fluido con el fin de llegar a dicha concentración después de la desorción.
- Se recomendaría el uso de un filtro antes del mezclador estático, para eliminar las impurezas de los fluidos y no tapar el mezclador, aunque habría que analizar la repercusión que tendría en la bomba el aumentar la resistencia al paso de los fluidos.
- Para hacer todavía mas flexible el sistema de mezclado, se podrían hacer las conexiones de la bomba de manera que se pudiesen emplear diferentes bombas dependiendo la viscosidad de los fluidos a mezclar.

## REFERENCIAS

- [1] J.C. Godfrey, N. Hamby, M. F. Edwards, *Mixing in the process Industries*, Ed. Butterworth London, (1985).
- [2] J. Bertrand, J. Villermaux (Coordonnauteurs), *Memorias del Congreso Mixing IX, Recent Advances In Mixing*, (Paris-Marne La Vallée 1997).
- [3] Robert H. Perry, *Manual del Ingeniero Químico*, vol. 5, (Ed. Mc. Graw-Hill), 418, (1994).
- [4] Chemineer, Inc., *Catálogo Kenics, Static Mixing Technology*, (1996).
- [5] Admixer Inc., *Catálogo For Sanitary and Critical Inline Processing*, (1996).
- [6] Holland, I. A. and Chapman, F. S. *Liquid mixing and processing in stirred tanks*, Reinhold Pub., New York. (1966).
- [7] Nienow, A. w., Edwards, M. F. and Harnby, N. Introduction to mixing problems. In: *Mixing in the Process Industries*, Butterworths Series in Chem. Eng. Eds. (1985)
- [8] S. J. Chen and Alan R. MacDonald, *Motionless Mixers For Viscous Polymers*, Chem. Eng. March, (1973).
- [9] P. Josshi, K.D.P. Nigam, E. B. Nauman, *The Kenics Static Mixers: New Data and Proposed Correlations*, The Chem. Eng. J. 59, 1995.
- [10] Jim J. Baker, *Motionless Mixers Stir Up New Uses*, Chem. Eng. (1991).
- [11] Chemineer Inc., *Kenics Innovation*, (1988).
- [12] K. Gokul Chandra, D.D. Kale, *Pressure Drop for Two-Phase Air-Non-Newtonian Liquid Flow in Static Mixers*. The Chem. Eng. J. 59, (1995).
- [13] F. A. Streiff, J. A. Rogers, *Don't Overlook Static Mixers Reactors*, Chem. Eng. (1994).
- [14] A. M. Al Taweel and L.D. Walker, *Liquid Dispersion in Static In-Line Mixers*, Chem. Eng. (1983).
- [15] Paul D. Berkman, Richard V. Calabrese, *Dispersion of Viscous Liquids by Turbulent Flow in a Static Mixers*, Chem. Eng. April (1988).
- [16] Robert G. Rader, Michael Mutsakis, F. Grosz-Roell and W. Maugweiler, *Better Absorption? Try a Static Mixer*, Chem. Eng. July (1989).

- [17]Roberto Reséndiz, Alfredo Martínez, Gabriel Ascanio and Enrique Galindo, *A New Pneumatic Bearing Dynamometer for Power Input Measurement In Stirred Tanks*, Chem. Eng. Technol. 14, (1991).
- [18]J. Chowdhury, *Motionless Mixers Stir Up Sluggish Markets*, Chem. Eng. 18 Mayo (1985).
- [19]Decelis M. J., Díaz D. *Propuesta Para la Sustitucion de Antioxidantes Mediante el uso de Nitrógeno en el Proceso de la Elaboración de Aceites y Grasas*. Tesis Profesional, UNAM, Mexico D. F. Diciembre de 1994.
- [20]K. B. Wang and L. T. Fan, *Mass Transfer in Bubble Columns Packed With Motionless Mixers*, Chem. Eng. Sci. Vol.33, 1978.
- [21]Aguirre Martínez A., Olmo Rodríguez I., *Transferencia de Masa Gas-Líquido en un Mezclador Estático En Fluidos Newtonianos*. Tesis Profesional, U.S.B, Agosto (1997).
- [22]Castro García de la Cadena B., *Diseño y caracterización de un sistema para la determinación independiente del consumo de potencia de impulsores múltiples en tanques agitados*. Tesis Profesional, UNAM, Septiembre (1995).

# APÉNDICE

# APENDICE

## ESPUMAS

Una burbuja es un glóbulo de gas o vapor rodeado por una masa de película delgada de líquido. La espuma es un grupo de burbujas separadas una de otra por películas delgadas y tiene una vida estática finita. Cuando existe una dispersión muy concentrada de burbujas en un líquido se considera nata. El que en un líquido aparezcan burbujas provocando la formación de espuma, se puede deber a:

- a) Sobresaturación de una solución del gas o por la descomposición de un componente líquido.
- b) Porque las burbujas son introducidas al líquido por medio de un aspersor o mediante un arrastre mecánico.
- c) La desintegración de burbujas mayores que se encuentren en el líquido.

Las espumas pueden representar problemas serios en sistemas gas-líquido, como la destilación, dispersión, evaporación, etc. Ejemplo de estos problemas se presentan en la fabricación de pulpa de papel, en fluidos de perforación de pozos petroleros, en la producción de pinturas, lubricantes, en el teñido textil, en la producción de café, detergente y tintas entre otros.

### **Técnicas físicas antiespumantes**

Estas técnicas físicas se refieren a los métodos mecánicos, térmicos y eléctricos, a veces se utilizan combinaciones de estos métodos aunados a antiespumantes químicos. Para eliminar la espuma, algunas veces se elimina la fuente de energía que la provoca, pero generalmente esto no resulta práctico en el proceso, en otras ocasiones la espuma es extraída y tratada o eliminada por separado, pero sólo momentáneamente, mientras se vuelve a formar nuevamente más espuma.

### **Métodos químicos**

#### **a) Con calentamiento**

Se puede elevar la temperatura de la espuma por arriba de su temperatura crítica, misma que se determina en forma experimental, con esto se disminuye la viscosidad de la superficie de la película que forma la espuma y tiende a desintegrarse.

#### **b) Con enfriamiento**

Enfriando la espuma hasta el punto de congelación, se propicia la formación de cristales de disolvente destruyendo la estructura de la espuma.

### c)Rocío

Este método consiste en elevar la temperatura de la espuma un poco y rociarla con agua fría, así al enfriarse la espuma se reduce la presión del gas en las burbujas causando su encogimiento.

### **Métodos mecánicos**

Estos métodos consisten en utilizar paletas que giran lentamente rompiendo la espuma, al girar las paletas producen una deformación de la espuma que causa la ruptura de las paredes de la película, en algunos casos estas paletas también limitan la elevación de la espuma.

### a)Vibración de presión y acústica

Por medio de pulsos de aire con alta frecuencia o con una amplitud grande y menor frecuencia, la vibración acústica también puede ser usada para destruir la espuma; esta vibración causa una vibración localizada de presión mediante ondas sonoras, experimentalmente se obtiene la frecuencia con que se rompe la espuma para cada caso.

### b)Técnicas químicas antiespumantes

Los agentes antiespumantes propician la destrucción rápida de la espuma con una pequeña cantidad de estos, los antiespumantes químicos están limitados por el efecto que pueden causar a la calidad del producto, el medio ambiente y la salud. Algunos antiespumantes usan silicón o sílice hidrofóbica entre otros, algunos productos que utilizan el empleo de agentes antiespumantes son los anticongelantes automotrices, el café instantáneo, etc.

## **EL OXÍGENO COMO PRINCIPAL FUENTE DE DETERIORO DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS.**

La cantidad en volumen de oxígeno que contiene la atmósfera es aproximadamente del 21%, que por contacto se disuelve en los productos alimenticios. De acuerdo al producto de que se trate y al contacto con el oxígeno pueden presentar oxidación, rancidez, degradación de sabores o color. Los productos contaminados con aire o vapor de agua (humedad) también pueden presentar estos cambios.

Para disminuir considerablemente las reacciones de deterioro se deberá reducir en el producto la concentración de oxígeno y humedad, dando como resultado un producto de mejor calidad con un tiempo prolongado de conservación. Una de las formas de lograrlo es por medio de burbujas en el producto líquido de un gas inerte, el nitrógeno principalmente. Una parte de este gas disuelto sale del líquido y permite la entrada de burbujas.

Por medio de un difusor poroso que se coloca en la línea donde fluyen los productos se realiza la inyección del nitrógeno. Los resultados obtenidos por este método son por un lado el permitir un desplazamiento efectivo del oxígeno disuelto y por otro no va a existir ninguna pérdida en la calidad del producto.

Una cualidad del nitrógeno gaseoso es que tiene una alta capacidad para desplazar los componentes del oxígeno y el vapor de agua que deben ser suprimidos de los alimentos.

Como un sustituto de antioxidantes, el nitrógeno puede ser una solución tanto de salud como comercial y resolver los problemas de calidad y producción en la industria aceitera.

Los estudios sobre el uso del nitrógeno para eliminar o reducir la concentración del oxígeno en la fabricación y almacenamiento de jugos de frutas, se comenzaron a realizar desde 1915 por diversos personajes, los cuales observaron que el color del jugo era mucho más estable sin la presencia del oxígeno.

Años más tarde se determinó que el contacto de aceites con el oxígeno daba como resultado la formación de peróxidos, enfatizando que estos peróxidos pueden ser una fuente importante de oxígeno causando diversos cambios y trayendo como consecuencia la alteración del producto. La corrosión interna de los contenedores metálicos así como la concentración de oxígeno en la atmósfera que rodea al líquido en el contenedor son otras fuentes de contaminación por oxígeno [19].

## **MÉTODO PARA ELIMINAR EL OXÍGENO EN LOS ACEITES.**

Se logra principalmente por medio de un método químico consistente en adicionar antioxidantes; así mediante dos métodos físicos que son la deaeración en vacío y la insuflación de nitrógeno en el aceite.

### **Deaeración en Vacío.**

Al eliminar el oxígeno de la atmósfera que se encuentra en contacto con el producto o al desplazar el oxígeno disuelto en dicho producto conseguiremos detener o incluso eliminar la mayoría de las degradaciones obteniendo así un tiempo prolongado de conservación del producto. En los aceites comestibles específicamente se logra reducir la formación de peróxidos.

La base fundamental es adicionando el nitrógeno puro al aceite que se pretende desoxigenizar, determinando así una sucesión de equilibrio entre presiones parciales del oxígeno contenido y el nitrógeno inyectado, siempre con el fin de reducir la concentración de oxígeno en el seno del aceite.

Cuando se burbujea nitrógeno en el aceite obtenemos un aumento considerable en el área interfacial entre el gas inerte y el líquido, implicando así una difusión mucho más rápida del oxígeno a la superficie.

En la mayoría de los deaeradores comerciales, se puede obtener una producción ideal al introducir el líquido dentro del cambiador al vacío a una temperatura un poco mayor que la temperatura de saturación correspondiente a la presión total. Esto se produce por la caída

eventual de la presión parcial sobre el líquido, creando con este incremento en la extracción del oxígeno una evaporación de los componentes volátiles y del agua, provocando un inconveniente importante cuando los productos volátiles son los principales responsables del aroma.

Un primer estudio en relación a la desoxigenación por nitrógeno se realizó a través del uso de columnas verticales en las que el aceite se trataba con nitrógeno en contracorriente, aún cuando este proceso era efectivo se abandonó entre otras causas por: El alto costo de las columnas, ya que las dimensiones de estas para tratar gran cantidad de producto eran considerables (6 m de altura por 70 cm de diámetro) y además por la dificultad para limpiar la espuma que se forma en lo alto de las columnas.

### **Antioxidantes.**

Son sustancias que se utilizan para preservar el alimento mediante la retardación de su deterioro, rancidez o decoloración debida a la oxidación. Algunos de los resultados obtenidos incluyen el desarrollo de olores y sabores rancios en grasas, aceites y lípidos contenidos en los alimentos, posibles oxidaciones tóxicas, decoloración de pigmentos, pérdidas de sabor y olor, cambios de textura y pérdida en valores nutricionales causadas por la destrucción de vitaminas y ácidos grasos.

Desde 1947 los antioxidantes se han utilizado para estabilizar las grasas. Se le atribuye su efecto inhibitor a la donación de electrones de hidrógeno a la grasa que contiene radicales libres formando un complejo entre el antioxidante y las cadenas de la grasa. Para que sea efectivo se deberá añadir al iniciar el proceso de manufacturación o cuando la grasa este terminada [19].

No existe un antioxidante que sea útil para el deterioro oxidativo de todos los productos alimenticios. La selección del antioxidante adecuado se determina de acuerdo a su compatibilidad y a los resultados efectivos obtenidos en ciertas grasas, ya sea grasas animales o aceites vegetales, además su uso debe de ser avalado por las Reglas Federales de cada país y contemplar su solubilidad en la grasa o en la fase acuosa del producto, así como una buena dispersión a través del alimento, sobre todo en alimentos bajos en grasa y su estabilidad o afinidad una vez procesada.

Aunado a esto la oxidación es catalizada por un sin fin de factores como el oxígeno, la luz, el calor, los metales pesados, pigmentos condiciones alcalinas y el grado de insaturación.

Los tipos de antioxidantes que existen son:

- 1) Compuestos que interceptan las cadenas de radicales libres en la oxidación de lípidos. Su función es la de interrumpir las cadenas con radicales libres en las reacciones de oxidación como por ejemplo el Butil Hidroxianisol (BHA) y el Butil Hidroxitolueno (BHT).



- 2) Reductores de oxígeno. Cuya función consiste en retardar la rancidez por medio de la transferencia de átomos de hidrógeno. Los más utilizados y eficientes son el palmitato ascórbico, sulfito de sodio, bióxido de sodio.
- 3) Agentes quelantes. En su estructura molecular tienen un par no compartido de electrones creando la formación de compuestos de coordinación. Entre los más utilizados se encuentra el ácido cítrico y sus sales, fosfatos y las sales del ácido etilenediamintetraacético (EDTA).
- 4) Antioxidantes secundarios cuya función es de romper los hidroperóxidos. Estos agentes descomponen el peróxido de hidrógeno durante la oxidación de lípidos en productos finales estables, dentro de estos se encuentran los lípidos y ácidos grasos[19].

Para preparar disoluciones existen muchos componentes, pero para fines de este trabajo sólo se mencionaran aquellas disoluciones que contengan dos compuestos únicamente. Estos pueden ser:

- Gas en gas
- Líquido en gas
- Sólido en gas
- Gas en sólido
- Líquido en sólido
- Sólido en sólido
- Gas en líquido
- Sólido en líquido
- Líquido en líquido

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

#### **Disoluciones de gases en líquidos.**

Los gases al disolverse en líquidos forman disoluciones verdaderas. Su grado de solubilidad va a depender de la naturaleza del gas y del disolvente, así como de la presión y temperatura. La solubilidad de los gases en la mayor parte de los líquidos va a disminuir al incrementar la temperatura.

#### **Determinación de la relación nitrógeno-producto**

Por lo general para que una disolución gas-líquido llegue a tener un equilibrio requiere de un tiempo bastante largo, por esto no es atractivo desde un punto de vista económico. Para aumentar esta velocidad y así alcanzar el equilibrio se aumenta el área superficial de las burbujas; y va a disminuir con la solubilidad del gas en el líquido, por lo que es necesario el poder generar burbujas pequeñas logrando así un área de contacto mayor entre las burbujas y el líquido y de esta manera realizar el proceso en menos tiempo.

Según Decelie Maciak y Díaz Nava la fracción volumen del oxígeno en el líquido ( $m$ ) es igual a:

$$m = \frac{m_0}{1 + \frac{V_g}{V_l} K}$$

donde:

$V_g/V_l$  Es la relación del volumen del gas inerte en el líquido

$V_g$  Es el volumen del gas inerte

$V_l$  Es el volumen del líquido

$m_0$  Fracción volumen del oxígeno (gas) en el líquido antes de inyectar nitrógeno

Se ha demostrado por medio de investigaciones experimentales que se puede lograr una eficiencia aproximadamente del 85% de volumen de oxígeno removido, con una relación de flujo de dos a uno, esto quiere decir el doble en nitrógeno gas por líquido en volumen [19].

### **Factores que influyen en la desoxigenación.**

La cantidad en volumen de oxígeno eliminado por una cantidad específica de nitrógeno va a depender de varios factores, los cuales han sido determinados por una serie de experimentos a nivel piloto. Entre los factores principales que influyen en la desoxigenación se encuentran los siguientes:

1) La naturaleza del líquido. Se debe principalmente a su viscosidad, por estudios realizados se ha demostrado que al incrementar la viscosidad del líquido se favorece la desoxigenación. Aunque esto no siempre es válido ya que depende de las propiedades fisico-químicas del producto.

2) Tiempo de contacto. Dependiendo de la velocidad de los fluidos, de la longitud de la tubería y del sistema de mezclado, por lo general se recomienda de 10 a 30 s, y si existe una sobrecantidad de nitrógeno es posible reducir el tiempo de contacto.

3) Tamaño de gota. Una disminución en el tamaño de la burbuja incrementa considerablemente la superficie de contacto entre el gas y el líquido, lo que da como resultado un equilibrio con mayor rapidez entre las presiones parciales de las fases gaseosa y líquida.

4) Número de etapas. Será menor la cantidad en volumen de oxígeno si la operación de desoxigenación se realiza varias veces, ya que en cada etapa se elimina cierta cantidad de oxígeno.

5) Cantidad de oxígeno disuelto. Cuanto mayor sea la cantidad de oxígeno será necesario utilizar más nitrógeno para obtener la concentración de oxígeno deseada.

### **Costos.**

Según Decelia Maciak y Díaz Nava quienes realizaron sus estudios utilizando un proceso con tanques agitados; al utilizar nitrógeno en lugar de antioxidante se obtendrá un ahorro del 75% aproximadamente en los costos mensuales, los costos de equipo y mantenimiento podrían ser más bajos si el mezclado se realizara por medio de mezcladores estáticos en lugar de tanques agitados mecánicamente.

Los problemas que se presentan al utilizar antioxidantes son:

- a) Dispersión incompleta
- b) Concentración inadecuada
- c) Incompatibilidad con grasas y aceites
- d) Cambios químicos del antioxidante
- e) Adición del antioxidante fuera de tiempo

Esto, además de alterar las características idóneas del producto, tiende a reducir al máximo los antioxidantes en los alimentos.

Al adicionar nitrógeno se mejora el producto y su estabilidad debido a los peróxidos que contiene y esto lo mantendrá en valores menores a los que tendría el producto con el uso de antioxidantes teniendo por resultado un aumento en la vida de anaquel y calidad más homogénea del producto terminado, además de las ventajas ya existentes, [19].

### **Protección del aceite contra la oxidación**

En la industria de aceites comestibles se le protege de la oxidación utilizando alguna o todas las medidas siguientes:

- Excluyendo el aire durante el procesamiento
- Enfriamiento del aceite a una temperatura adecuada antes de exponerlo a la atmósfera
- Protegiendo el aceite de la atmósfera inertizando con nitrógeno.
- Agregando productos químicos que sirven como purificadores de metales y antioxidantes.

## **MÉTODO DEL OXIGENO ACTIVO (ESTABILIDAD)**

Para determinar el grado de rancidez del aceite existen varios métodos; uno de éstos es mediante el índice de peróxidos.

La técnica consiste en agregar a la mezcla ácido acético y cloroformo; se añade una solución saturada de ioduro de potasio y se le agrega agua, se titula lentamente con una solución estándar de tiosulfato de sodio hasta que desaparezca el color amarillo. Se agrega el indicador hasta que el color azul desaparece. La determinación se realiza simultáneamente con un blanco.

Otra técnica más subjetiva es la de aplicar un flujo de aire en la superficie del aceite y por medio del olor determinar el grado de rancidez.