



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO HIDRODINAMICO DE UN TANQUE
DE TEMPLE MEDIANTE UN MODELO FISICO

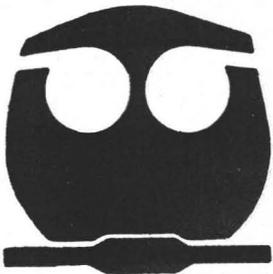
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

ULISES ANDRADE OSTIO



MEXICO, D. F.



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

2005.

m 342434



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente Prof. José Bernardo Hernández Morales
Vocal Prof. José Antonio Barrera Godínez
Secretario Prof. Arturo Alejandro Sánchez Santiago
1er Suplente Prof. Oscar Jesús Rendón Gómez
2do Suplente Prof. Elisa Fabila Montoya

Sitio donde se desarrolló el tema:

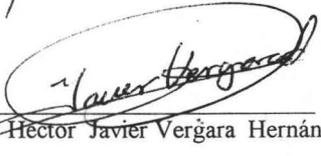
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Facultad de Química, Edificio "D", Lab. 005

Asesor del tema



Dr. José Bernardo Hernández Morales

Supervisor técnico



M. en C. Héctor Javier Vergara Hernández

Sustentante



Ulises Andrade Ostio

Agradecimientos

A la mujer que con esfuerzo y cariño nos guió a mis hermanos y a mí ¡Gracias Madre!

A quien siempre me ha apoyado en mis decisiones ¡Gracias Padre!

A las personas con las que he compartido mi vida, mis hermanos:

Aníbal y Homero

A Juana Evangelina Guzmán Rosales por estar mi lado.

Al Dr. Bernardo Hernández gracias por sus enseñanzas y paciencia.

A mi amigo Héctor por confiar en mí.

A Edgar Miguel Segura por su ayuda en los experimentos.

A Israel Herraiz gracias por su asesoría.

A mis compañeros de carrera y amigos:

Rafael, Félix, Iván, Saúl, Paco, Carlos, Mauro, Atahualpa, Ángeles, Blondie.

CONTENIDO

Contenido	i
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	vii
Nomenclatura	viii
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Tanques de temple	3
2.2. Modelos físicos	4
2.3. Flujo ideal y flujo no ideal	5
2.4. La distribución de tiempos de residencia	6
2.5. Técnica experimental estímulo-respuesta	7
2.6. Tiempo medio de residencia y curvas adimensionales	9
2.7. Cálculo de volumen estancado, flujo pistón y volumen de mezcla	10
3. Objetivo	13
4. Procedimiento experimental	14
4.1. Equipo experimental	14
4.2. Visualización del patrón de flujo	16
4.3. Construcción de Curvas RTD	17
4.4. Condiciones experimentales	18

5. Resultados	20
5.1. Reproducibilidad de las pruebas experimentales	20
5.2. Características de las curvas experimentales	22
5.3. Efecto del flujo alimentado en el patrón de flujo del tanque	23
5.3.1. Visualización del patrón de flujo	23
5.3.2. Curvas RTD: Descripción del comportamiento del fluido	25
5.4. Variación del patrón de flujo en el interior del tanque	29
5.4.1. Flujo de entrada bajo (20 L/min)	30
5.4.2. Flujo de entrada alto (35 L/min)	35
5.5. Efecto de un modificador de flujo en el patrón de flujo	40
5.5.1. Visualización del patrón de flujo	40
5.5.2. Curvas RTD del modelo con modificadores	43
5.5.2.1. Efecto de modificadores de flujo operando a flujo de entrada bajo (20L/min)	43
5.5.2.2. Efecto de modificadores de flujo operando a flujo de entrada alto (35 L/min)	46
6. Discusión de resultados	49
6.1. Efecto del flujo alimentado al tanque	49
6.2. Efecto de un modificador de flujo	50
7. Conclusiones	54

Apéndice

Bibliografía

Índice de Figuras

2.1	Tanque de temple con sistema de agitación de flujo direccionado.....	4
2.2	Representaciones de flujo en pistón (a) y de flujo en mezcla completa (b).....	5
2.3	Líneas de flujo a través de un reactor donde existen volúmenes muertos [8] representados en las esquinas del reactor.....	6
2.4	Distribución de tiempos de residencia ó curva E para fluido fluyendo a través de un reactor.....	7
2.5	Señales a la entrada para entradas de trazador en impulso (a) y en escalón (b).....	8
2.6	Curvas E para distintos comportamientos de fluido. (a) Flujo pistón, (b) Mezcla completa (c) Flujo arbitrario.....	9
2.7	Flujo a través de regiones activa y muerta en un modelo combinado.....	10
4.1	Modelo físico del tanque de temple: (a) vista frontal; (b) vista superior.....	14
4.2	Equipo complementario del modelo físico de tanque de temple. (1) Flujómetro, (2) Línea de alimentación, (3) Modelo Físico, (4) Línea de salida, (5) Tinaco, (6) Punto de inyección del trazador.....	15
4.3	Esquema del modelo físico de tanque de temple dividido en doce zonas.....	18
4.4	(a) Esquema del modelo físico con el modificador de flujo colocado a 10.5 cm de la entrada del modelo y a una altura del fondo de 0.5cm, justo entre las zonas 9 y 10. (b) Detalle del modificador de flujo, el ángulo entre el modificador y el fondo del modelo es de 120°. (1) Placa modificadora de flujo, (2) y (3) Brazo sujetador de la placa.....	19
5.1	Procedimiento del tratamiento de datos experimentales.....	20
5.2	Curvas de potencial eléctrico vs. tiempo obtenidas para dos pruebas con flujo de alimentación 25 L/min, sin modificadores y con medición en la salida del modelo.....	21
5.3	Curva experimental potencial eléctrico vs. tiempo medida en la zona 6 para un impulso de trazador. El experimentó se llevó a cabo operando el sistema a un flujo de entrada de 35 L/min.....	23
5.4	Fotografías del modelo de tanque de temple durante la prueba experimental en la	

	que se perturbó al sistema con un impulso de trazador visual operando a un flujo de entrada de 35 L/min. Las fotografías corresponden a los tiempos: (a) 1.28, (b) 3.38 y (c) 4.50 s después de la entrada del trazador.....	24
5.5	Curvas E del modelo físico para distintos flujos de alimentación de (a) 20, (b) 25, (c) 30 y (d) 35 L/min y sin modificador de flujo obtenidas con mediciones a la salida del modelo, usando entrada de trazador en impulso.....	26
5.6	Curva F del modelo físico de tanque de temple operando a flujo 25 L/min. El recuadro es un acercamiento a la sección del diagrama donde se determina la fracción de flujo en pistón.....	28
5.7	Variación de los porcentajes de los tipos de flujo en el modelo físico a distintos flujos de alimentación.....	29
5.8	Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región superior del modelo físico de tanque de temple operando a flujo de entrada de 20 L/min: (a) zona 1, (b) zona 2, (c) zona 3 y (d) zona 4.....	31
5.9	Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región media del modelo físico de tanque de temple operando a flujo de entrada de 20 L/min: (a) zona 5, (b) zona 6, (c) zona 7 y (d) zona 8.....	32
5.10	Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región inferior del modelo físico de tanque de temple operando a un flujo de entrada de 20 L/min: (a) zona 9, (b) zona 10, (c) zona 11 y (d) zona 12.....	33
5.11	Tiempos medios de residencia medidos en las doce zonas del interior del tanque a un flujo de alimentación de 20 L/min.....	34
5.12	Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región superior del modelo físico de tanque de temple operando a un flujo de entrada de 35 L/min: (a) zona 1, (b) zona 2, (c) zona 3 y (d) zona 4.....	36
5.13	Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región media del modelo físico de tanque de temple operando a un flujo de entrada de 35 L/min: (a) zona 5, (b) zona 6, (c) zona 7 y (d) zona 8.....	37

5.14	Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región inferior del modelo físico de tanque de temple operando a un flujo de entrada de 35 L/min: (a) zona 9, (b) zona 10, (c) zona 11 y (d) zona 12.....	38
5.15	Tiempos medios de residencia medidos en las doce zonas del interior del tanque a flujo de alimentación de 35 L/min.....	39
5.16	Fotografías del modelo físico de tanque de temple tomadas durante la prueba en la que se implementó un modificador de flujo de dimensiones 10x5 cm colocado a una distancia de la entrada de 10.5 cm, sin separación del fondo del modelo, y un ángulo de inclinación de 120°, el flujo de entrada fue de 35L/min con una entrada de trazador visual en impulso. Las fotografías corresponden a los tiempos (a) 1.72, (b) 2.82 y (c) 4.09 s después de la entrada del trazador.....	40
5.17	Fotografías del modelo físico de tanque de temple tomadas durante la prueba en la que se implementó un modificador de flujo de dimensiones 10x5 cm colocado a una distancia de la entrada de 10.5 cm, con una separación del fondo del modelo de 0.5 cm, y un ángulo de inclinación de 120°, el flujo de entrada fue de 35L/min con una entrada de trazador visual en impulso. Las fotografías corresponden a los tiempos (a) 1.25, (b) 2.72 y (c) 4.25 s después de la entrada del trazador.....	42
5.18	Curva E del experimento en la que se usó un modificador de flujo ubicado a 10.5 cm de la entrada con una inclinación de 120° sin separación del fondo del modelo físico, se utilizó trazador físico con entrada en impulso y un flujo de entrada de 20 L/min.....	44
5.19	Curva E del experimento en el que se usó un modificador de flujo ubicado a 10.5 cm de la entrada con una inclinación de 120° con una separación del fondo del tanque de 0.5 cm, se utilizó trazador físico con entrada en impulso y un flujo de entrada de 20 L/min.....	45
5.20	Variación de las fracciones de tipos de flujo en el modelo físico al implementar modificadores de flujo operando el sistema a flujo de entrada 20 L/min.....	46
5.21	Curvas E de las pruebas en las que se implementó un modificador a 10.5 cm de la entrada con un ángulo de inclinación de 120° colocado a distintas alturas (H=0 y H=0.5 cm) del fondo del modelo físico, realizadas a un flujo de entrada	

de 35 L/min usando una entrada de trazador físico en impulso. También se grafica la curva E para el mismo flujo de entrada sin modificador de flujo.....	47
5.22 Variación de los tipos de flujo en el modelo físico al implementar modificadores de flujo operando el sistema a flujo de entrada 35 L/min.....	48
6.1 Patrón de flujo del modelo físico operando sin modificadores de flujo.....	50
6.2 Patrón de flujo del modelo físico de tanque de temple usando un modificador de flujo colocado a una distancia de la entrada de 10.5 cm, sin separación del fondo del modelo físico, y un ángulo de inclinación de 120°.....	51
6.3 Patrón de flujo del modelo físico de tanque de temple usando un modificador de flujo colocado a una distancia de la entrada de 10.5 cm, con una separación del fondo del modelo físico de 0.5cm, y un ángulo de inclinación de 120°.....	52
A-I Curva de potencial-tiempo de la que se tomaron los datos para la prueba de sensibilidad del análisis. La curva se obtuvo de la medición en la salida de un trazador físico, sin uso de modificador y a un flujo de entrada de 25 L/min.....	56

Índice de tablas

5.1	Porcentaje de los tipos de flujo a un flujo de alimentación de 25 L/min, sin modificador de flujo, determinados con mediciones en la salida del modelo físico.....	21
A-I	Datos de tipos de flujo al usar distintos porcentajes de datos de la misma prueba, obtenida por medición en la salida del modelo a un flujo de entrada de 25 L/min.....	57

Nomenclatura

C : Concentración de trazador ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)

A : Área bajo la curva concentración-tiempo ($\text{s}\cdot\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)

C_0 : Concentración del trazador en un experimento de entrada en escalón ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)

C : Concentración normalizada

E : Edades de fluido en la corriente de salida (s^{-1})

E : Respuesta en la salida a un estímulo introducido en forma de impulso (adimensional)

F : Respuesta en la salida a un estímulo introducido en forma de impulso (adimensional)

\bar{t} : Tiempo medio de residencia (s)

\bar{t}_c : Tiempo medio medido hasta $\theta = 2$

Q : Flujo total a través del reactor (L/min)

Q_a : Flujo a través de la región activa del reactor ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)

Q_d : Flujo a través de la región muerta ó estancada del reactor ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)

V : Volumen total del reactor (L)

V_a : Volumen activo en el reactor (L)

V_p : Volumen de flujo en pistón (L)

V_m : Volumen de mezcla completa (L)

V_d : Volumen muerto ó estancado (L)

θ : tiempo adimensional

$\bar{\theta}_c$: Tiempo medio de residencia adimensional

1. Introducción

El temple es un tratamiento térmico que se aplica a piezas de acero para incrementar la dureza y la resistencia al desgaste, características indispensables en la mayoría de las aplicaciones industriales. Una planta de tratamientos térmicos puede incluir hornos donde las piezas de acero son carburizadas calentándolas a temperaturas tales que el carbono contenido en la atmósfera de estos hornos se solubilice y difunda en el acero. Enseguida de los hornos de carburización, se encuentran los tanques de temple, usualmente de gran volumen, conteniendo algún fluido (agua, salmueras ó aceites a temperaturas relativamente bajas) en el que las piezas, dentro de canastillas especiales son sumergidas. El rápido enfriamiento de la pieza y el aumento de concentración de carbono cerca de la superficie genera la transformación del acero a una fase fuera del equilibrio la cual proporciona al material las propiedades mecánicas requeridas.

La rapidez de enfriamiento del acero durante el temple es crítica puesto que si es demasiado rápida el acero puede fracturarse ó alcanzar una distorsión tal que la pieza de acero pierda las dimensiones requeridas. Pero si la rapidez de enfriamiento no es suficiente el acero puede transformar en otras fases que no tienen las propiedades necesarias. Una variable de operación gran importancia en el temple es la agitación que tiene el fluido ó medio de enfriamiento en el tanque de temple, ya que está directamente relacionada con la transferencia de calor entre las piezas y el fluido. La no uniformidad de la agitación en un tanque de temple puede provocar diferentes velocidades de enfriamiento en las piezas de acero.

En este trabajo se estudió la hidrodinámica del baño de temple en un modelo físico. Para ello se utilizaron técnicas de visualización con colorantes y de estímulo-respuesta mediante las cuales es posible caracterizar el patrón de flujo en un reactor, determinando el grado de desviación que tiene el fluido con respecto a un comportamiento ideal (flujo pistón ó mezcla completa).

La técnica experimental utilizada genera curvas que representan la distribución de tiempos de residencia a partir de las cuales es posible obtener descripciones cualitativas y cuantitativas del comportamiento del fluido dentro del sistema. Usando esta herramienta se estudió el efecto del flujo alimentado al tanque de temple y el efecto de un modificador de flujo sobre el patrón de flujo.

2. Antecedentes

2.1 Tanques de temple

Los tanques de temple son utilizados para contener al medio de enfriamiento que extrae la energía térmica de la pieza. Suelen tener mecanismos de agitación para homogeneizar la temperatura del baño. Para el diseño de los tanques de temple se toman en cuenta factores como: peso de acero a ser templado, tamaño y forma de las piezas, grado del acero y propiedades finales requeridas [1]. Una variable que se considera principalmente para la determinación del tamaño de los tanques es la capacidad requerida en número de piezas por hora.

Los tanques de temple se diferencian en el método que se utiliza para agitar al fluido que contienen [1]:

- Agitación por propelas: este método es muy empleado para direccionar flujo alrededor de la carga durante el templado.
- Agitación con bombas centrifugas: son usadas para hacer circular el medio de enfriamiento a través de intercambiadores de calor que ayudan a controlar la temperatura durante el tratamiento.
- Agitación con boquillas sumergidas: consiste en la inyección de fluido por el fondo del tanque, esto con el fin de direccionar el flujo hacia la carga. El líquido inyectado por las boquillas suele ser impulsado por bombas centrifugas.
- Agitación con flujo direccionado: se deriva de la agitación con propelas y se utiliza en sistemas en los que el tanque es profundo. Consiste en impulsar al fluido a través de un tubo orientado por esquinas redondeadas y/o baffles (modificadores de flujo) y una mampara (ver Fig. 2.1), con lo que el flujo del fluido es direccionado. La mampara se utiliza para asegurar que exista presión debajo de la propela y así prevenir la cavitación.

- **Agitación mecánica:** A diferencia de los demás métodos que implican control del flujo del fluido, este método consiste en obtener la agitación del fluido mediante el movimiento de las piezas templadas para lo que se utilizan dispositivos que proveen movimiento oscilatorio a las piezas durante el tratamiento.

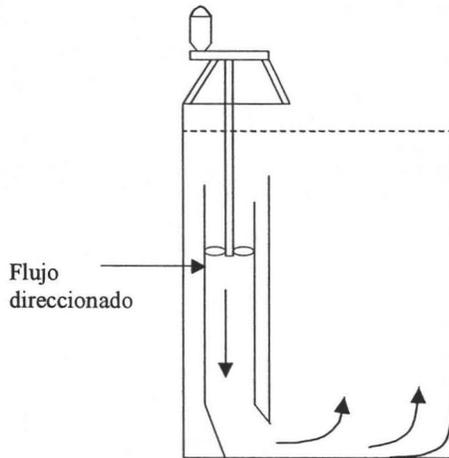


Figura 2.1 Tanque de temple con sistema de agitación de flujo direccionado [1].

2.2 Modelos físicos

Un modelo físico es una representación física de un sistema [2]. Usualmente se construye de materiales y equipo distintos a los del sistema modelado, con el fin de economizar costos y de realizar mediciones que en una planta industrial serían casi imposibles de lograr. En el estudio de procesos metalúrgicos se han utilizado modelos físicos para visualizar patrones de flujo en contenedores tales como: moldes de colada continua [3], baños para galvanizado [4], tundishes (distribuidores) [5] y reactores AOD [6], entre otros.

Existen tres tipos de modelos físicos:

1. Modelos físicos rigurosos: son construidos observando criterios de similitud [2] entre el modelo y el prototipo, de manera que los resultados de los experimentos efectuados en el modelo físico, son útiles (mediante un apropiado escalamiento) para describir el comportamiento del sistema real.
2. Modelos físicos aproximados: este tipo de modelos físicos se utiliza para el estudio de los fenómenos físicos relevantes que ocurren en el sistema real, generalmente con el fin de obtener información para la construcción de un modelo matemático.
3. Modelos físicos cualitativos: son usados para llevar a cabo experimentos cuando es necesario obtener un entendimiento cualitativo de como los parámetros clave del proceso se relacionan entre sí [2].

Estudiar un proceso mediante un modelo físico facilita mediciones experimentales además de que el costo es razonablemente inferior a lo que implica un estudio en el que se utiliza un modelo matemático aunque este último tenga una mayor flexibilidad en cuanto a las posibilidades de modificar parámetros.

2.3 Flujo ideal y flujo no ideal

El flujo en reactores se describe a partir de dos condiciones ideales extremas: flujo en pistón y flujo en mezcla ó en mezcla completa (ver Fig. 2.2). El primero se usa para describir a un fluido que fluye a través de un reactor sin que los elementos del fluido se mezclen entre sí conservando todos, una misma velocidad. En cambio el flujo en mezcla completa implica una composición igual en cualquier parte del reactor en cualquier momento [7].

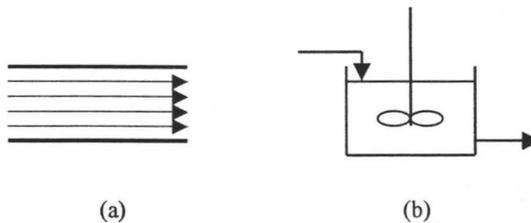


Figura 2.2 Representaciones de flujo en pistón (a) y de flujo en mezcla completa (b).

El flujo no ideal, que ocurre en casi todos los reactores industriales, se refiere a desviaciones del flujo ideal ó a comportamientos de fluido que están compuestos por fracciones de ambos flujos ideales (flujo en pistón y flujo en mezcla completa), o bien zonas en las que el fluido fluye a menor velocidad que en el resto del reactor, a las que se les conoce como volúmenes muertos ó estancados (Fig. 2.2), elementos de fluido que recirculan a través del reactor (flujo de recirculación) ó que lo atraviesan por un camino más corto que el recorrido por la mayor parte del fluido, a esta última anomalía se le conoce como corto circuito. Es indispensable dejar en claro que no es necesario que todos estos fenómenos ocurran al mismo tiempo para considerar un flujo como no ideal.

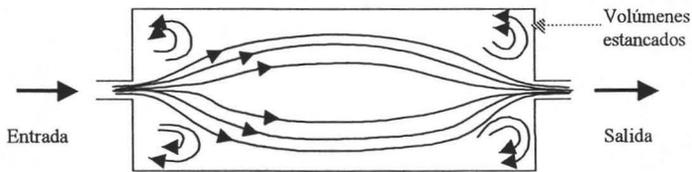


Figura 2.3 Líneas de flujo a través de un reactor donde existen volúmenes muertos, representados en las esquinas del reactor [8].

2.4 La distribución de tiempos de residencia

En un reactor industrial los elementos de fluido que entran recorren distintos caminos antes de llegar a la salida. Esto provoca que los distintos elementos de fluido tarden distintos tiempos en abandonar el contenedor. A la distribución de estos tiempos en la corriente de salida se le conoce como distribución de tiempos de residencia (RTD) ó curva E y se representa de manera que el área bajo la curva sea igual a la unidad (ecuación 2.1) [9].

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (2.1)$$

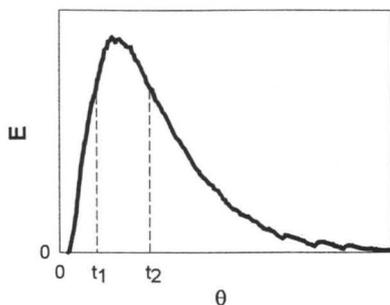


Figura 2.4 Distribución de tiempos de residencia ó curva E para fluido fluyendo a través de un reactor.

La fracción de área de la curva E posterior a t_1 corresponde a la cantidad de fluido que cruzó el reactor después del t_1 (Fig. 2.4), de manera que la fracción de área contenida entre dos tiempos (integral entre t_1 y t_2) es equivalente a la fracción de fluido que pasó por el contenedor en dicho intervalo de tiempo. La distribución de tiempos de residencia de un contenedor puede obtenerse experimentalmente y es utilizada para describir el comportamiento de reactores.

2.5 Técnica experimental estímulo-respuesta

El método experimental para determinar la distribución de tiempos de residencia se llama estímulo-respuesta y consiste en perturbar al sistema y medir la respuesta a la salida. Generalmente se utiliza un trazador a manera de estímulo y como respuesta se registra la concentración de trazador en la salida.

Existen dos tipos de trazador que son utilizados para estos experimentos: trazadores reactivos y trazadores no reactivos ó físicos. Los primeros se usan para casos especiales en los que es de interés el estudio de un proceso en el que existen reacciones químicas. Sin embargo, existen aplicaciones en las que no es necesario que el trazador reaccione dentro del reactor ó contenedor, para las que son utilizados los trazadores físicos. Un trazador adecuado es aquel que tiene la misma densidad que el fluido de trabajo y no se adsorbe en ninguna región del sistema [7].

Este tipo de experimentos puede realizarse usando distintos tipos de entrada de trazador al sistema: entrada de impulso (pulsación), de escalón, periódica ó al azar. Los resultados que se obtienen de los dos primeros tipos de entrada son más fáciles de interpretar y por esa razón son los más utilizados.

Para una entrada en impulso es necesario realizar una adición instantánea (pulsación ó impulso) de trazador en la corriente de entrada. La curva de concentración-tiempo normalizada en la salida es llamada curva C; la operación de normalización consiste en dividir la concentración medida en la salida (C) entre el área bajo la curva concentración-tiempo medida (A) es decir:

$$\int_0^{\infty} C(t) dt = \int_0^{\infty} \frac{C(t)}{A} dt = 1 \quad (2.2)$$

Si a la corriente de entrada se le agrega una corriente adicional ó esta es cambiada por una de trazador, se dice que se tiene una entrada en escalón. La medición en la salida de trazador en forma de C/C_0 donde C_0 es la concentración de trazador vs. tiempo es llamada curva F. [9]. La respuesta a estos dos tipos de entrada medidos en la corriente de entrada del reactor se indican en la Fig. 2.5. La respuesta del sistema en la salida del reactor es la que describe su comportamiento.

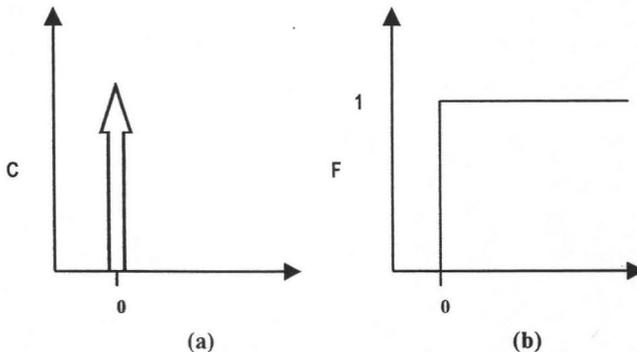


Figura 2.5 Señales a la entrada para entradas de trazador en impulso (a) y en escalón (b).

Los flujos ideales son fácilmente reconocibles cuando se conoce la curva E correspondiente, el flujo en pistón se describe como una cima de altura infinita y espesor cero ubicada justo en la unidad de tiempo adimensional, por su parte el flujo en mezcla completa es una curva que tiene ordenada uno y desciende gradualmente ver Fig. 2.6.

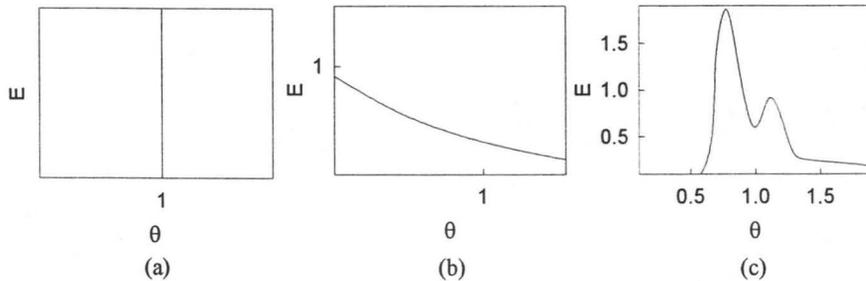


Figura 2.6 Curvas E para distintos comportamientos de fluido. (a) Flujo pistón, (b) Mezcla completa (c) Flujo arbitrario [9].

2.6 Tiempo medio de residencia y curvas adimensionales

El tiempo promedio que tardan los elementos de fluido en abandonar un contenedor ó reactor es el tiempo medio de residencia (\bar{t}) y esta definido como [9]:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (2.3)$$

En ocasiones el análisis de un experimento requiere expresar los tiempos de residencia en forma adimensional, para lo cual se calcula al tiempo adimensional (θ) que es la razón entre el tiempo y el tiempo medio de residencia:

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad (2.4)$$

La distribución de tiempos de residencia adimensional (E) se obtiene aplicando las ecuaciones siguientes [9]:

$$\frac{C}{A} = C = E \quad (2.5)$$

$$E = \bar{t} E \quad (2.6)$$

La curva F es adimensional de origen y es igual a la integral de la curva E

$$F = \int_0^t E(t) dt \quad (2.7)$$

2.7 Cálculo de volumen estancado, flujo pistón y volumen de mezcla

Para describir el flujo en reactores existen modelos de flujo. Estos consideran que existe determinada combinación de tipos de flujo con fenómenos como volúmenes muertos, corto circuitos ó recirculación [7]. Se les llama modelos combinados y pueden ser predichos a partir de la morfología de las curvas RTD. Uno de los modelos mas usados es el modelo combinado, que considera que en el contenedor existen los dos tipos de flujo ideal y un volumen muerto ó estancado.

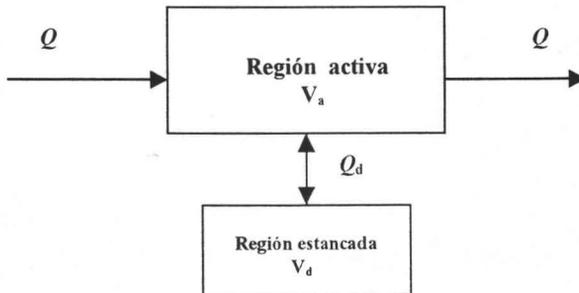


Figura 2.7 Flujo a través de regiones activa y muerta en un modelo combinado.

En los modelos combinados se considera que existen regiones de flujo en pistón (V_p), regiones de flujo mezclado (V_m) y regiones muertas (V_d). Además, el flujo total a través del contenedor (Q) se divide en distintos flujos a través del contenedor, tales como: 1) flujo activo (Q_a), que es el que fluye por las regiones de flujo en pistón y de mezclado, y 2) flujo a través de la región muerta ó estancada (Q_d). También puede existir flujo de recirculación (corrientes que al llegar a la salida se desvían y vuelven a recorrer el reactor) y flujo de corto circuito (aquel que se desvía de la trayectoria del fluido y encuentra un camino mas corto hacia la salida del contenedor).

Para el cálculo del volumen estancado [10] se puede considerar un modelo combinado (Fig. 2.7) que consiste en dos regiones: 1) una región activa, compuesta por la región en flujo pistón y la región de flujo de mezclado y 2) una región de volumen muerto. Esta última se define normalmente como la cola de las curvas RTD's, es decir es el fluido que permanece en el contenedor mas de dos veces el tiempo medio de residencia [8].

El tiempo medio de residencia adimensional ($\bar{\theta}_c$) es la razón del tiempo medio de residencia hasta $\theta=2$ entre el tiempo medio de residencia:

$$\bar{\theta}_c = \frac{\text{tiempo medio medido hasta } \theta=2}{\text{tiempo medio de residencia}} = \frac{\bar{t}_c}{\bar{t}} \quad (2.8)$$

Sin embargo el tiempo medio de residencia en términos adimensionales es igual a uno, por lo que la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$\bar{\theta}_c = \frac{\int_0^2 \theta E(\theta) d\theta}{\int_0^{\infty} E(\theta) d\theta} \quad (2.9)$$

Si la ecuación (2.8) se describe en términos de volumen activo y total y flujo activo y total:

$$\bar{\theta}_c = \frac{\bar{t}_c}{\bar{t}} = \frac{V_a/Q_a}{V/Q} = \left(\frac{V_a}{V}\right) * \left(\frac{Q}{Q_a}\right) \quad (2.10)$$

Entonces, la fracción de volumen activo esta definida por:

$$\frac{V_a}{V} = \left(\frac{Q_a}{Q} \right) * \bar{\theta}_c \quad (2.11)$$

De esta manera la fracción de volumen muerto es:

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \left(\frac{Q_a}{Q} \right) * \bar{\theta}_c \quad (2.12)$$

La relación entre el flujo activo y el flujo total se obtiene con la siguiente integral:

$$\frac{Q_a}{Q} = \int_0^2 E(\theta) d\theta \quad (2.13)$$

Se considera que el flujo en pistón equivale al valor del tiempo adimensional cuando ha salido el 1% del trazador [11]. Esto se puede leer de la curva F cuando el valor de F es 0.01.

El volumen de mezcla se calcula con la siguiente relación:

$$V_m = 1 - \frac{V_p}{V} - \frac{V_d}{V} \quad (2.14)$$

Existe un software llamado CAFLUR (<http://caflur.sourceforge.net/>) que permite realizar el cálculo de las fracciones de flujo en pistón, volumen estancado y de mezcla completa encontrando la ordenada al origen y la pendiente de la curva $\ln I(\theta)$ vs θ .

3. Objetivo

Para optimizar el diseño y operación de baños de temple industriales es necesario conocer la hidrodinámica del baño, dado que esta afecta directamente a los patrones de extracción de calor que, a su vez, definen la respuesta metalúrgica de las piezas durante el temple. Así, en este trabajo se plantea el siguiente

Objetivo general

Caracterizar experimentalmente las condiciones hidrodinámicas en un tanque de temple.

Objetivo específico

Evaluar el efecto del flujo de entrada y de la presencia de un modificador de flujo sobre las fracciones de los tipos de flujo (pistón, de mezcla completa y muerto) en un modelo físico de un tanque de temple.

Para alcanzar los objetivos se definieron las siguientes actividades:

1. Construcción de un modelo físico de un tanque de temple.
2. Selección de niveles de las variables independientes.
3. Realización de experimentos de visualización de flujo.
4. Realización de experimentos para obtener curvas estímulo-respuesta (potencial eléctrico vs. tiempo).
5. Cálculo del porcentaje presente de cada tipo de flujo en el tanque.

4. Procedimiento experimental

En este capítulo se describe el equipo experimental y el procedimiento utilizado para realizar los experimentos de visualización y para obtener las curvas experimentales estímulo-respuesta (potencial eléctrico vs. tiempo). Esta información se procesó para obtener las curvas RTD con las que se describieron los patrones de flujo y las fracciones de los tipos de flujo presentes en el sistema.

4.1 Equipo experimental

Se utilizó un modelo físico de un tanque de temple de escala geométrica 1:10 para realizar todas las mediciones, tomando como prototipo los tanques de temple de la planta de tratamientos térmicos de la empresa TREMEC ubicada en la ciudad de Querétaro. El modelo físico se muestra esquemáticamente en la Fig. 4.1.

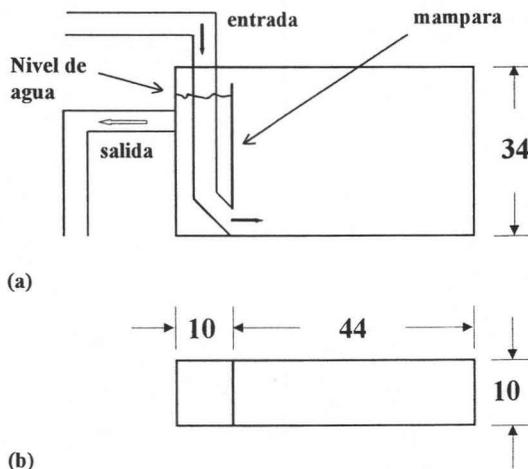


Figura. 4.1 Modelo físico del tanque de temple: (a) vista frontal; (b) vista superior.

El modelo se construyó en acrílico de 0.05 m de espesor y se usó agua como fluido de trabajo. La altura, longitud y ancho del modelo físico son 0.34 m, 0.54 m y 0.10 m. Una mampara colocada a 0.10 m a lo largo y a 0.01m del fondo del modelo lo separa en dos zonas: una zona de circulación del fluido y una zona de contención, por esta última ingresa una manguera que alimenta de agua al modelo, la manguera entra hasta la abertura debajo de la mampara (ancho=0.10 m, altura=0.01 m) para que el fluido ingrese directamente a la zona de circulación, el fluido abandona esta zona justo por arriba de la mampara entrando a la zona de contención de donde es eliminado por una línea de salida.

El equipo que se utilizó para los experimentos realizados se muestra en la Fig. 4.2 y consistió del modelo físico, al que se alimentó agua mediante una bomba de 3 Hp desde un tinaco de 180 L. Un flujómetro marca Blue White modelo F-420 ubicado antes de la entrada al modelo físico midió el flujo alimentado. Después de circular por el modelo físico el agua se dirigía hacia un recipiente adicional para ser reutilizada en la siguiente prueba.

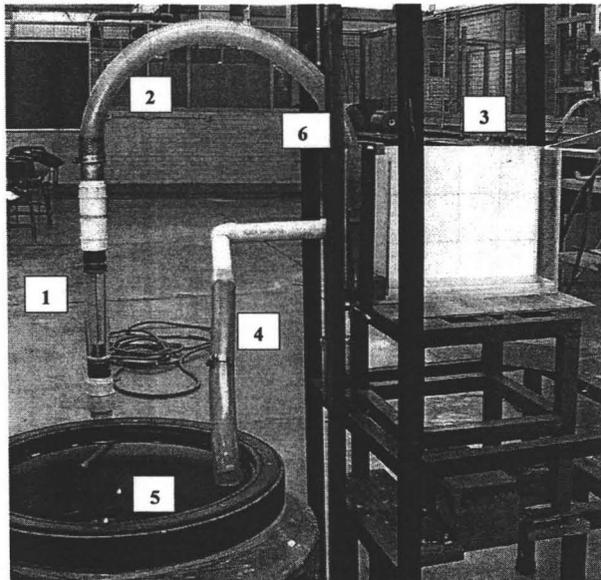


Figura 4.2 Equipo complementario del modelo físico de tanque de temple. (1) Flujómetro, (2) Línea de alimentación, (3) Modelo Físico, (4) Línea de salida, (5) Tinaco, (6) Punto de inyección del trazador.

En este estudio se utilizó agua por la facilidad de su manejo y, principalmente, debido a que se requirieron experimentos en los que eran importantes lograr la visualización. Cabe señalar que en TREMEC como en muchas plantas donde se aplican tratamientos térmicos, se usan aceites especiales como fluido de enfriamiento y que estos tienen propiedades físicas distintas a las del agua.

4.2 Visualización del patrón de flujo

Todos los experimentos consistieron en introducir una pulsación ó impulso de trazador al sistema inyectando trazador en un orificio de la línea de alimentación ubicado a 45 cm de la entrada al modelo y medir la respuesta a la salida del modelo físico.

Antes de iniciar cada experimento se realizó una operación para eliminar burbujas que quedaban atrapadas en la línea de alimentación consistente en aumentar el flujo durante unos segundos; después, al observar que estas cesaban de entrar al modelo, el flujo era ajustado al requerido para el experimento correspondiente. Las burbujas eran eliminadas para evitar mediciones equivocadas del sistema ya que el trazador podría adsorberse a alguna burbuja y atravesar el tanque en corto circuito.

La temperatura del fluido se midió también antes de iniciar cada experimento, ya que esta se necesita para la transformación de los datos de f.e.m. a concentración de iones $[H^+]$.

Para visualizar el patrón de flujo en el modelo físico se videograbaron experimentos en los que se inyectó un trazador visual (colorante vegetal rojo #40 a una concentración de 35 g/L). La videocámara fue colocada a 2 m de frente del modelo para grabar los experimentos.

Para la determinación experimental de la distribución de edades del fluido dentro del modelo se usó un trazador físico (ácido sulfúrico 98.4% y ácido sulfúrico diluido con agua 1:1). Un electrodo de pH marca Orión modelo 912600 se colocó en la salida del modelo físico para registrar la respuesta del sistema al estímulo. El sistema completo de medición y adquisición constó, además del electrodo, de un pHmetro marca Cole-Palmer modelo 05669-20, una tarjeta de adquisición de datos marca Keitley, modelo SmartLink y una computadora con el software Netacq versión 2.0. El sistema de adquisición registraba datos de f.e.m. (en mV) y tiempo en (s) la frecuencia de adquisición fue 1 Hz.

4.3 Construcción de Curvas RTD

Las mediciones de la respuesta al impulso fueron procesadas para obtener las curvas RTD necesarias para la descripción del comportamiento del fluido. Los pasos seguidos, que se detallan más adelante, fueron:

1. Transformación* de los datos de potencial eléctrico a valores de concentración de $[H^+]$
2. Cálculo del área bajo la curva Concentración-tiempo
3. Cálculo de C ó E
4. Cálculo de tiempo medio de residencia
5. Cálculo de tiempo adimensional
6. Cálculo de $E(\theta)$
7. Cálculo de $F(\theta)$

* La forma de la ecuación de Nernst que se utilizó se presenta en el capítulo de resultados.

4.4 Condiciones experimentales

Para estudiar el efecto del flujo alimentado al modelo físico en el patrón de flujo se realizaron mediciones a flujos de entrada de 20, 25, 30 y 35 L/min. Debe señalarse que el flujo máximo que puede utilizarse en el modelo físico es de 35 L/min. Como complemento se realizaron mediciones en el interior del modelo, para lo cual éste se dividió en doce zonas de igual volumen ver (Fig. 4.3). En estas mediciones el sensor del electrodo fue colocado en el centro de cada uno de estos volúmenes; estas pruebas se realizaron a flujos de entrada de 20 y 35 L/min.

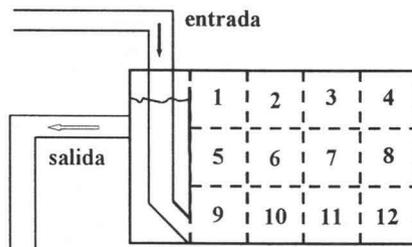


Figura 4.3 Esquema del modelo físico de tanque de temple dividido en doce zonas.

Se estudió el efecto de modificadores de flujo usando placas de acrílico de 5 x 10 cm, colocadas a 10.5 cm de la entrada del modelo, y formando un ángulo de 120° con la horizontal (Fig. 4.4). Se utilizó un brazo sujetador, consistente en dos placas de acrílico ranuradas y un tornillo, para mantener al modificador en su lugar. Para estos experimentos se utilizaron dos alturas de la placa modificadora respecto al fondo del modelo: cero y 0.5 cm (Fig. 4.4). Las variantes de modificador fueron probadas a 20 y 35 L/min.

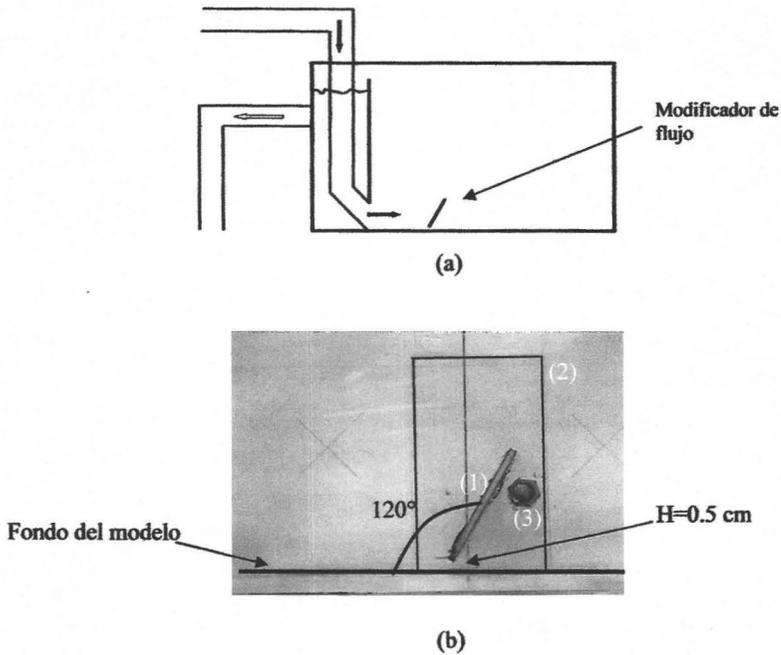


Figura 4.4 (a) Esquema del modelo físico con el modificador de flujo colocado a 10.5 cm de la entrada del modelo y a una altura del fondo de 0.5cm, justo entre las zonas 9 y 10. (b) Detalle del modificador de flujo, el ángulo entre el modificador y el fondo del modelo es de 120°. (1) Placa modificadora de flujo, (2) y (3) Brazo sujetador de la placa.

5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos experimentalmente. A partir de los datos de potencial eléctrico vs. tiempo adquiridos se construyeron curvas adimensionales de distribución de tiempo de residencia (RTD). En primer lugar, los valores de f.e.m. que se obtuvieron se transformaron a valores de concentración con una corrección de temperatura, usando la ecuación de Nernst. Además para poder comparar entre sí diversas curvas experimentales el tiempo de inyección y el potencial correspondiente a ese tiempo fueron tomados para normalizarlas. Las curvas adimensionales que se construyeron fueron curvas E y F. El procedimiento se esquematiza en la Fig. 5.1.

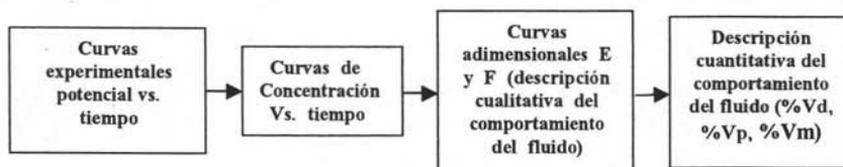


Figura 5.1 Procedimiento del tratamiento de datos experimentales.

5.1 Reproducibilidad de las pruebas experimentales

Cada experimento se realizó por duplicado para asegurar la reproducibilidad de las pruebas. Sin embargo, hubo variaciones en algunos resultados que obligaron a repetir algunas pruebas más de dos veces; además, para obtener resultados confiables se evaluaron los resultados de las pruebas tanto cualitativa como cuantitativamente. La evaluación cualitativa consistió en que las pruebas de las mismas condiciones presentarán la misma morfología en la misma proporción. Como ejemplo se toman los experimentos en los que se midió la respuesta al impulso de trazador en la salida a un flujo de alimentación de 25 L/min (ver Fig. 5.2) donde principalmente se observan diferencias de desfase en el tiempo de respuesta y en la zona donde el potencial baja lentamente; sin embargo ambas curvas tienen la misma tendencia en la misma proporción, cabe señalar que el tiempo de respuesta está relacionado con la determinación de las fracciones de los tipos de flujo.

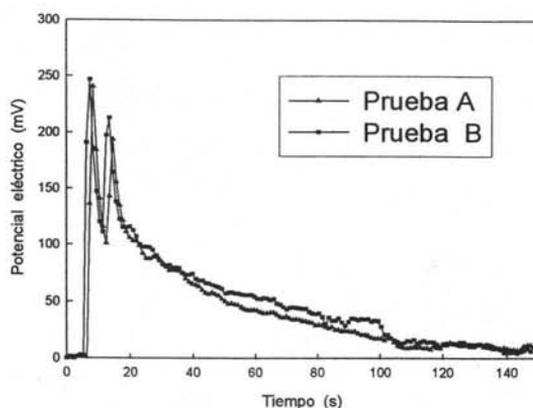


Figura 5.2 Curvas de potencial eléctrico vs. tiempo obtenidas para dos pruebas con flujo de alimentación 25 L/min, sin modificadores y con medición en la corriente de salida.

Cuantitativamente, la reproducibilidad de las pruebas se evaluó mediante los datos de tipos de flujos. La Tabla (5.1) muestra los resultados de la determinación de los porcentajes de los tipos de flujos para los experimentos de 25 L/min con mediciones en la salida del modelo físico. Se observa que los resultados tienen poca variación; la variabilidad es producto del comportamiento estocástico del sistema.

A pesar de las diferencias en algunas pruebas, la repetición de estas y las evaluaciones a las que fueron sometidas brindan una confiabilidad aceptable para los propósitos del presente estudio.

Tabla 5.1 Porcentajes de los tipos de flujo a un flujo de alimentación de 25 L/min, sin modificador de flujo, determinados con mediciones en la salida del modelo físico.

Experimento	% Vd	% Vp	% Vm
A	22.64	52.92	24.44
B	23.4	49.5	27.1
Promedio	23.0	51.2	25.8
Desviación estándar	0.52	2.40	1.88

5.2 Características de las curvas experimentales

Las curvas experimentales de potencial eléctrico vs. tiempo presentaron en general dos tipos de comportamiento: Uno cuando la respuesta se midió en la corriente de salida y algunas zonas del tanque y otro principalmente en zonas centrales del modelo físico (ver Fig. 4.3). El comportamiento obtenido en los experimentos donde se midió la respuesta en la corriente de salida se ejemplifica en la Fig. 5.2, donde después de la pulsación de trazador no se observó respuesta hasta después de algunos segundos (este tiempo es el que el frente de trazador tardó en llegar a la salida). Después, hay un máximo en la concentración de trazador. Posteriormente se observó otro incremento en la concentración (reflejo de la recirculación que existe en el tanque). Después de estos dos picos, la concentración oscila ligeramente mientras decrece, (causado esto también de la recirculación de un trazador diluido). Después viene una disminución gradual que indica que el trazador se ha mezclado y está abandonando el tanque lentamente hasta que el potencial eléctrico vuelve a tomar valores aproximados a los del inicio de la prueba.

En las zonas centrales del tanque, se observó otro tipo de comportamiento, en la Fig. 5.3 se ilustra la respuesta de un impulso de trazador sin usar modificadores de flujo medida en la zona 6. En este tipo de respuesta también existe un intervalo de tiempo después de la inyección de trazador en el que no se registró respuesta alguna del sistema, es después de aproximadamente 4 ó 5 segundos cuando la concentración comienza a aumentar de manera gradual. Después de un máximo, la concentración de trazador disminuye a menor velocidad lo que genera una cola larga. El trazador que llega a esta zona se ha mezclado en el recorrido a través del tanque y se sigue mezclando para después salir de esta zona a una velocidad menor con relación a la del resto del tanque.

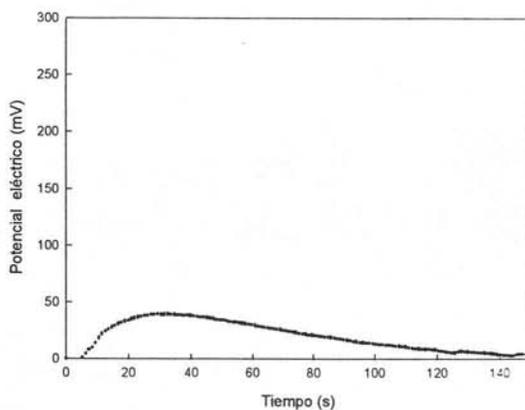


Figura 5.3 Curva experimental potencial eléctrico vs. tiempo medida en la zona 6 para un impulso de trazador. El experimento se llevó a cabo operando el sistema a un flujo de entrada de 35 L/min.

5.3 Efecto del flujo alimentado en el patrón de flujo del tanque

El efecto del flujo alimentado al modelo físico sobre el patrón de flujo se evaluó mediante observaciones visuales y el análisis de las curvas E obtenidas experimentalmente.

5.3.1 Visualización del patrón de flujo

Se efectuaron pruebas a 20, 25, 30 y 35 L/min como flujo de entrada, empleando un trazador visual con una entrada en impulso. Los resultados muestran que, por ejemplo para un flujo de entrada de 35 L/min, el fluido ingresa al tanque y recorre la parte baja de este (zonas 9, 10, 11 y 12 de la Fig. 4.3 p 18) siguiendo una trayectoria esencialmente recta aunque existe dispersión apreciable del trazador hacia la región central (Fig. 5.4a).

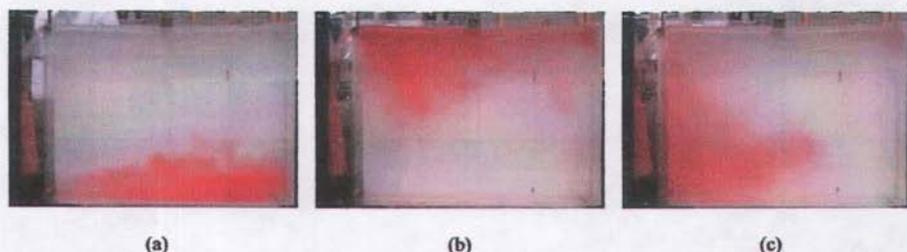


Figura 5.4 Fotografías del modelo de tanque de temple durante la prueba experimental en la que se perturbó al sistema con un impulso de trazador visual operando a un flujo de entrada de 35 L/min. Las fotografías corresponden a los tiempos (a) 1.28, (b) 3.38 y (c) 4.50 s después de la entrada del trazador.

Al llegar el frente de trazador al límite del modelo en la zona 12, choca perdiendo ímpetu y se desvía hacia la región superior, pasando por la zona 8. Es en la zona 4, al llegar a la superficie, cuando el colorante cambia de dirección dirigiéndose hacia la salida del tanque, sin embargo al atravesar la zona 2 el trazador comienza a presentar una gran dispersión hacia la zona central (ver Fig. 5.4b), lo que provoca que no todo el colorante abandone el modelo físico en el mismo momento. El fluido que se ha desviado hacia el centro no logra salir del tanque pero mantiene un gran ímpetu que lo impulsa hacia la parte baja del modelo, donde es impulsado por la corriente de entrada. Parte del trazador, la punta del frente se integra a la corriente de entrada y vuelve a recorrer el modelo de la forma que ya se ha descrito. De esta manera sale un poco de trazador en cada ciclo de giro; al cabo de cinco ciclos no se aprecia colorante en la zona periférica.

El trazador más rezagado (Fig. 5.4c) también recibe impulso de la corriente de entrada. Sin embargo, se mueve por la región central del tanque parte superior de las zonas 9 y 10 e ingresa a las zonas 6 y 7 donde el movimiento es rotatorio y de menor velocidad que en la periferia. El fluido que ingresa en esta zona permanece allí más tiempo que el fluido que recircula por la región periférica del tanque.

Las diferencias encontradas al modificar el flujo de entrada son la forma en cómo se mueve el fluido en la zona central del modelo físico y las veces que el fluido recircula dentro del tanque antes de abandonarlo. A flujos de entrada bajos el fluido no es retenido tanto tiempo en la zona central y después de tres giros el trazador no es visible en el modelo. En cambio, para flujos mayores, el trazador que ingresa a la zona central del modelo permanece un mayor tiempo en esta zona ya que al cabo de cinco ciclos de giro el trazador aun es visible en esta zona.

5.3.2 Curvas RTD: Descripción del comportamiento del fluido

El potencial eléctrico medido en la salida del modelo físico fue transformado a valores de concentración de $[H^+]$ mediante la ecuación de Nernst que, aplicada a mediciones con un electrodo de vidrio como las realizadas en este trabajo, toma la siguiente forma:

$$E' - E = 2.303 \left(\frac{RT}{F} \right) [pH(X) - pH(P)] \quad [13] \quad (5.1)$$

Donde:

$E' - E$: f.e.m. medida en la salida del reactor

R : Constante universal de los gases ($8.314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$)

F : Constante de Faraday ($9.649 \times 10^4 \text{ Cmol}^{-1}$)

X : Es una disolución de pH desconocido

P : Es una disolución patrón del electrodo de vidrio

T : Temperatura de las soluciones (K)

Posteriormente se graficó la curva concentración vs. tiempo, de la que se obtuvieron las curvas $E(\theta)$ y $F(\theta)$ (adimensionales) utilizando las ecuaciones (2.3) (2.4), (2.5) y (2.6).

Las curvas E de las pruebas experimentales en las que se varió el flujo alimentado desde 20 hasta 35 L/min se muestran en la Figura 5.5. Todas las curvas presentan un pico alto seguido de otro pico de mucho menor tamaño (que ya no alcanza a apreciarse en la curva E correspondiente al experimento en el que el flujo de entrada fue de 35 L/min); después, la concentración baja sin alcanzar inmediatamente el valor inicial de concentración, lo que se aprecia como una cola larga. Cabe señalar que en las graficas presentadas en la Figura 5.5 no se muestra gran parte de las colas, para una mejor apreciación del comportamiento de las curvas.

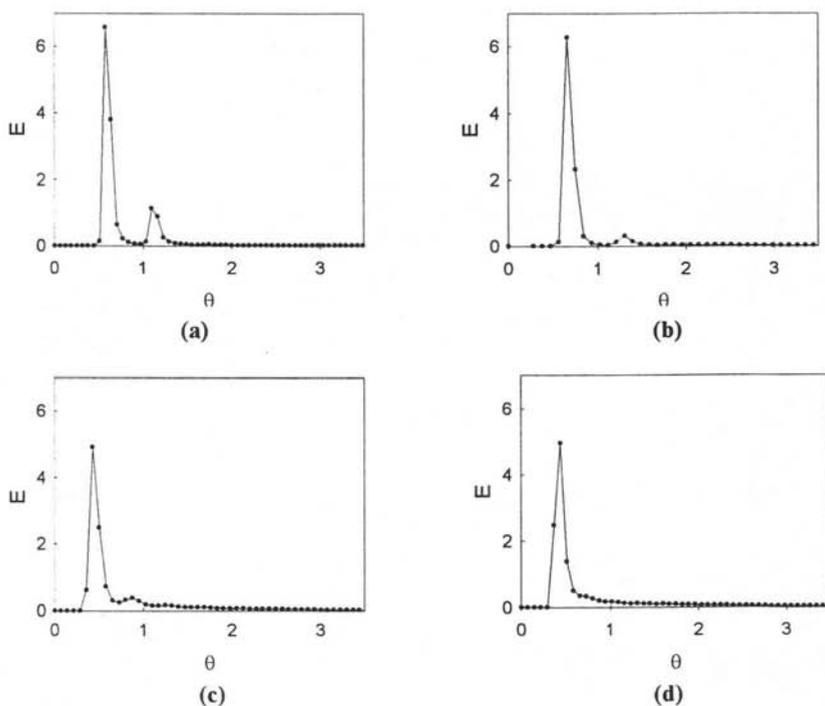


Figura 5.5 Curvas E del modelo físico para distintos flujos de alimentación de (a) 20, (b) 25, (c) 30 y (d) 35 L/min y sin modificador de flujo obtenidas con mediciones en la corriente de salida, usando entrada de trazador en impulso.

Las curvas de los flujos extremos (20 y 35 L/min) presentan diferencias significativas. La respuesta en concentración para el flujo de 20 L/min (Fig. 5.5a) es más estrecha y alta, es decir es más aproximada al comportamiento de flujo pistón. La segunda cima que aparece en la mayoría de las curvas no aparece en las curvas de las pruebas a 35 L/min a pesar de que en los videos es evidente que existe recirculación; es probable que esto se deba a la mayor cantidad de mezcla que indica el mayor espesor de la cima de la curva E de estos experimentos (Fig. 5.5d).

Para la determinación de los tipos de flujo fue necesario resolver las integrales de las ecuaciones (2.9) y (2.13) presentadas en el capítulo de antecedentes. Cabe señalar que para los cálculos las integrales fueron evaluadas numéricamente. La determinación del volumen de flujo en pistón se realizó mediante la curva F tomando el valor de θ cuando $F = 0.01$ mientras que el volumen de mezcla se calculó utilizando la ecuación (2.14).

En el siguiente ejemplo se muestra el cálculo para el volumen estancado y volumen de flujo en pistón para los datos experimentales mostrados en la Fig. 5.2 donde el flujo de alimentación fue 25 L/min, no se utilizaron modificadores y el potencial eléctrico fue medido en la corriente de salida del tanque.

El tiempo medio de residencia adimensional se calcula como:

$$\bar{\theta}_c = \frac{\int_0^2 \theta E d\theta}{\int_0^2 E d\theta} = \frac{0.7736}{0.9398} = 0.8231$$

La fracción de flujo activo es:

$$\frac{Q_a}{Q} = \int_0^2 E d\theta = 0.9398$$

Entonces la fracción de volumen muerto

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} * \bar{\theta}_c = 1 - (0.9398) * (0.8231) = 0.2264$$

El valor de la fracción de volumen de flujo en pistón de la Fig. 5.6 es 0.53; entonces, el volumen de mezcla es:

$$V_m = 1 - \frac{V_p}{V} - \frac{V_d}{V} = 1 - 0.53 - 0.2264 = 0.2436$$

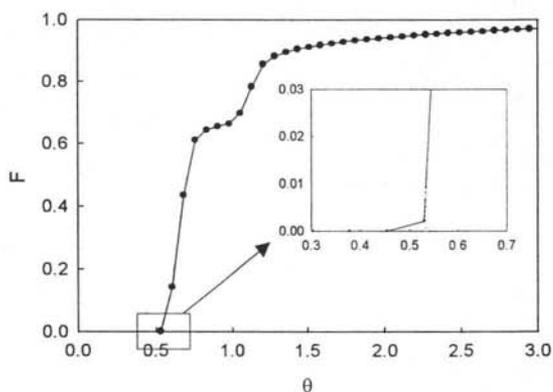


Figura 5.6 Curva F del modelo físico de tanque de temple operando a flujo 25 L/min. El recuadro es un acercamiento a la sección del diagrama donde se determina la fracción de flujo en pistón.

La determinación de las fracciones de los tipos de flujo en el modelo físico confirmó lo observado en los videos de las pruebas con trazador visual y las curvas RTD ya que indica que el volumen estancado se incrementó al operar con altos flujos de alimentación. El volumen de mezcla también se incrementó al aumentar el flujo, razón por la que no es posible notar la recirculación en las curvas E a flujos altos. El volumen de flujo en pistón fue mayor a flujos de entrada bajos (Fig. 5.7).

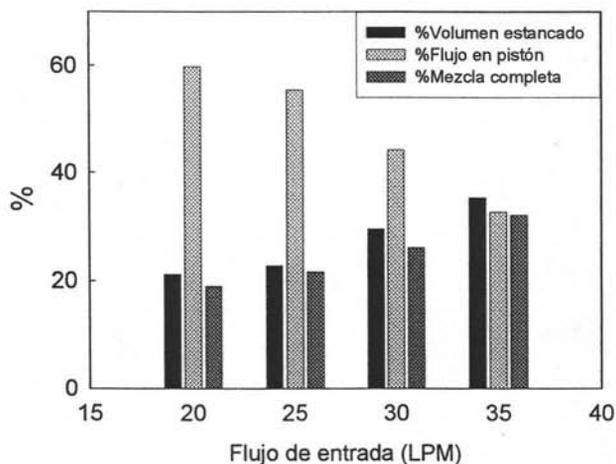


Figura 5.7 Variación de los porcentajes de los tipos de flujo en el modelo físico a distintos flujos de alimentación.

5.4 Variación del patrón de flujo en el interior del tanque

Para evaluar las variaciones del comportamiento del fluido en el interior del tanque se realizaron pruebas experimentales en las que se perturbó al sistema con un impulso de trazador físico y se registró la respuesta al impulso en 12 distintas zonas del modelo físico, una a la vez, estas pruebas se realizaron operando el sistema a los flujos de entrada de 20 y 35 L/min.

5.4.1 Flujo de entrada bajo (20 L/min)

La morfología de las curvas varío de acuerdo a la zona del tanque en la que se registró la respuesta al impulso. En general fueron tres los tipos de curvas encontrados a lo largo del modelo físico que se clasificaron como tipos a, b y c.

Curvas tipo a: Este tipo de curvas se observó en la región superior del tanque (zonas 1 a 4). La respuesta al impulso consistió en dos cimas ó picos, el primero de mayor altura, seguidos de una cola larga. Esta morfología corresponde a un flujo en pistón con recirculación y volumen estancado; este último es deducido del desfase hacia la izquierda de los picos con respecto al valor de 1.0 adimensional y, por supuesto de la cola larga de la Fig. 5.8. Sin embargo, como no se trata de una medición hecha a la salida del tanque, y el trazador, recorre otros sitios del modelo físico es posible considerar únicamente la primera parte de las curvas y describir el comportamiento del fluido en estas zonas como flujo pistón.

Curvas tipo b: La región en la que se obtuvieron estas curvas corresponde a las zonas 5, 6, 7, 9, 10 y 11, es decir la zona central y baja del tanque (Fig. 5.9 y 5.10). La respuesta al impulso es un aumento súbito de la concentración, excepto para la zona 6 donde el aumento es gradual. Una vez que incrementa la concentración ocurre una serie de oscilaciones, después de las cuales se presenta un decrecimiento gradual de la concentración. La curva de la zona 6 tampoco presenta las oscilaciones en la cima, sin embargo fue considerada en este tipo de comportamiento por la proximidad de las zonas y debido a que ambas morfologías de curva indican un modelo de flujo en el que existe flujo en pistón y volumen de mezcla, con remansos estancados. Existe en estas zonas recirculación que causa la inestabilidad en las cimas de las curvas, misma que no es observada en la zona 6 por ser justamente la zona central, donde el movimiento es menor. En cuanto al volumen estancado este se puede ignorar por la razón mencionada en el párrafo anterior, por lo que el comportamiento se reduce a un flujo en mezcla combinado con flujo en pistón.

Curvas tipo c: Este tipo de curvas solo se encontró en la región inferior derecha, zonas 8 y 12 (Fig. 5.9d y 5.10d). La respuesta en este caso esta conformada únicamente por un pico y la cola que ha caracterizado a todas las curvas, que de nuevo puede ser omitida para describir el comportamiento de estas zonas, como de flujo pistón con desviación hacia mezcla completa debido a lo ancho de las cimas.

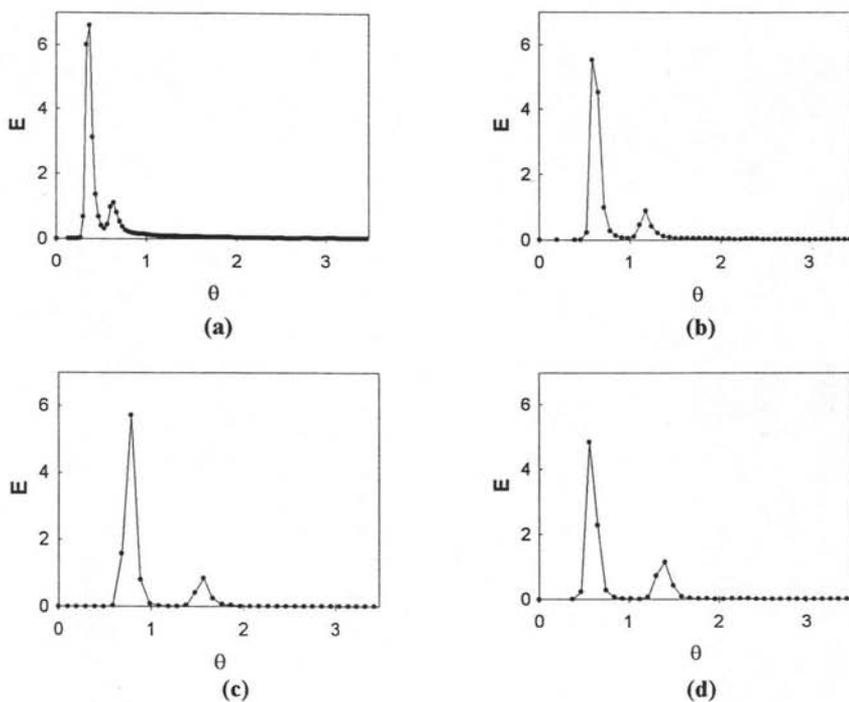


Figura 5.8 Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región superior del modelo físico de tanque de temple operando a flujo de entrada de 20 L/min: (a) zona 1, (b) zona 2, (c) zona 3 y (d) zona 4.

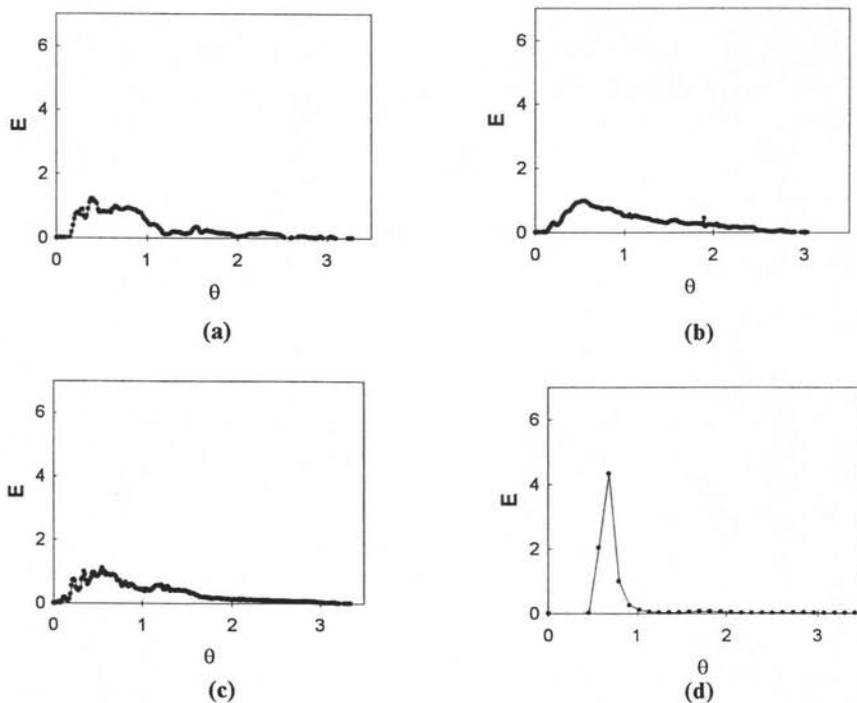


Figura 5.9 Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región media del modelo físico de tanque de temple operando a flujo de entrada de 20 L/min: (a) zona 5, (b) zona 6, (c) zona 7 y (d) zona 8.

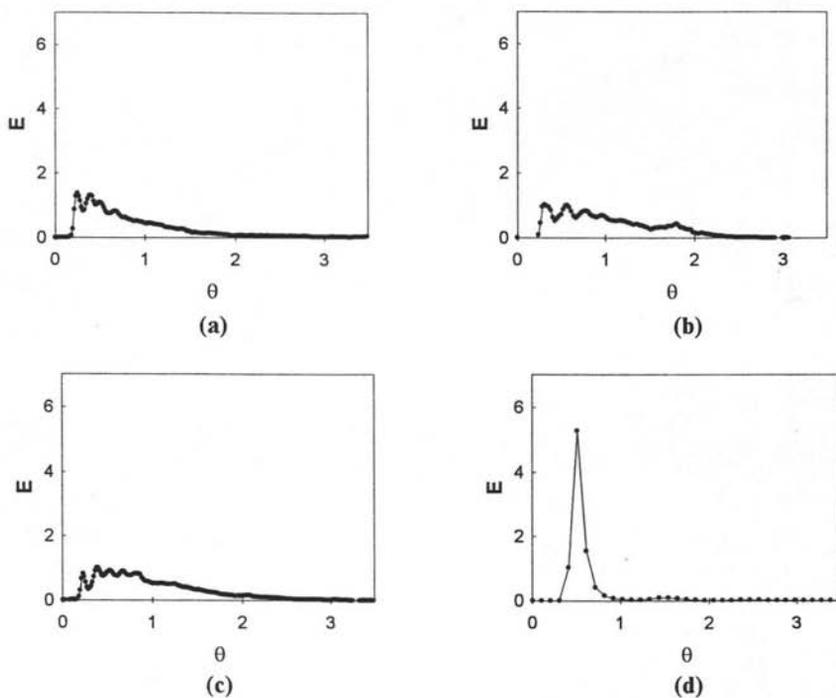


Figura 5.10 Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región inferior del modelo físico de tanque de temple operando a un flujo de entrada de 20 L/min: (a) zona 9, (b) zona 10, (c) zona 11 y (d) zona 12.

En el proceso de construcción de las curvas RTD se calculó el tiempo medio de residencia en las distintas zonas del tanque usando la ecuación 2.3. Cabe señalar que dichos tiempos no son del todo válidos puesto que no provienen de mediciones en la salida de reactores, sin embargo son una medida del tiempo que el trazador tardó en abandonar cada una de las zonas del tanque.

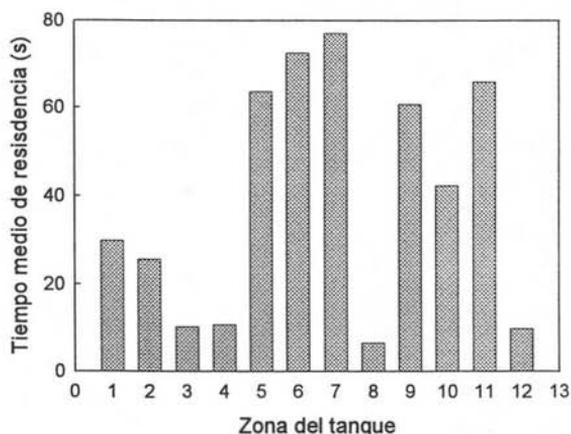


Figura 5.11 Tiempos medios de residencia medidos en las doce zonas del interior del tanque a un flujo de alimentación de 20 L/min.

Se describe lo siguiente en el orden en el que el fluido recorre el tanque: las zonas 9, 10 y 11 presentaron tiempos de residencia altos, a pesar de ser zonas por donde el fluido pasa justo después de ingresar al tanque. Es posible que esto se deba a que la corriente de entrada de flujo 20 L/min pasa muy por debajo de donde se ubica el sensor del electrodo, por lo que este no registró el fluido nuevo sino el que ya había recorrido gran parte del tanque. En la zona 12, el fluido no sufre retrasos y el tiempo de residencia es corto puesto que en esta zona el fluido choca contra la pared del modelo y cambia de dirección a gran velocidad. Las zonas 8 y 4 que el fluido recorre a continuación también presentaron tiempos de residencia cortos. La zona 8 presenta prácticamente el mismo patrón de flujo en toda su extensión, un flujo ascendente, en cambio la zona 4 tiene la misma característica que la 12 puesto que existe un cambio de dirección de la trayectoria del fluido.

El tiempo de residencia en la zona 3 es corto porque el patrón de flujo en esta zona es, al igual que en la 8, uniforme en una dirección; sin embargo, al llegar a las zonas 1 y 2 va perdiendo ímpetu lo que provoca que el tiempo de residencia presente una tendencia a aumentar.

En las zonas 5 6 y 7 se obtuvo el mayor tiempo de permanencia del fluido. Esto es debido a que esta región del tanque mantiene al fluido en el movimiento rotatorio y de menor velocidad que en el resto del tanque de manera que la salida del fluido se ve retardada (Fig. 5.11).

5.4.2 Flujo de entrada alto (35 L/min)

Al igual que para el flujo de entrada bajo se encontraron tres tipos de respuestas. Estos tipos de curvas son muy similares a las observadas anteriormente y, por lo tanto por se clasificaron de igual manera.

Curvas tipo a: También presentan dos picos y una cola larga, pero ahora las curvas tienen una segunda cima de altura similar a la primera, señal de una fuerte recirculación, incluso se alcanza a apreciar una tercera cima en la curva correspondiente a la zona 11; el comportamiento para las zonas que presentan este tipo de curvas sigue siendo flujo en pistón. A diferencia del comportamiento operando a flujo de entrada bajo, no es solo la región superior (zonas 2, 3 y 4 graficadas en la Fig. 5.12) la que presentó este comportamiento, sino que también las zonas 8, 10 y 11 (Fig. 5.13 y 5.14) exhibieron curvas similares.

Curvas tipo b: Encontradas en la región central del tanque (zonas 5, 6 y 7) Fig. 5.13, donde de acuerdo a las observaciones visuales es la zona de menor velocidad, la respuesta esta conformada por un aumento gradual de la concentración, excepto para la zona 5 donde el aumento es súbito, seguido de un también descenso gradual. La estabilidad ó suavidad mostrada en las curvas de esta región se atribuye al buen grado de mezcla que se alcanza a un flujo de entrada alto 35 L/min. Es precisamente así como se describe el comportamiento del fluido en esta zona: como un volumen de mezcla combinado posiblemente con flujo pistón, lo que no es posible determinar exactamente.

Curvas tipo c: Respuestas de un solo pico y cola larga presentes únicamente en las zonas 9 y 1, es decir en la entrada y salida del modelo físico (Fig. 5.11a y 5.13a), al igual que las curvas de tipo a indican flujo en pistón, pero al presentar estos un ligero cambio de pendiente casi al cerrar la cima se puede considerar que existe volumen de mezcla en proporciones pequeñas.

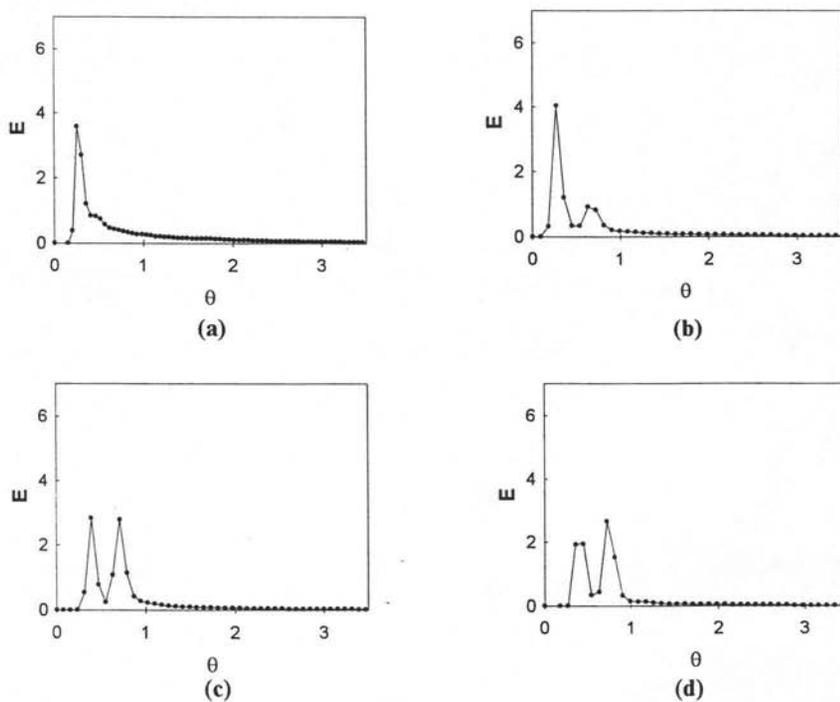


Figura 5.12 Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región superior del modelo físico de tanque de temple operando a un flujo de entrada de 35 L/min: (a) zona 1, (b) zona 2, (c) zona 3 y (d) zona 4.

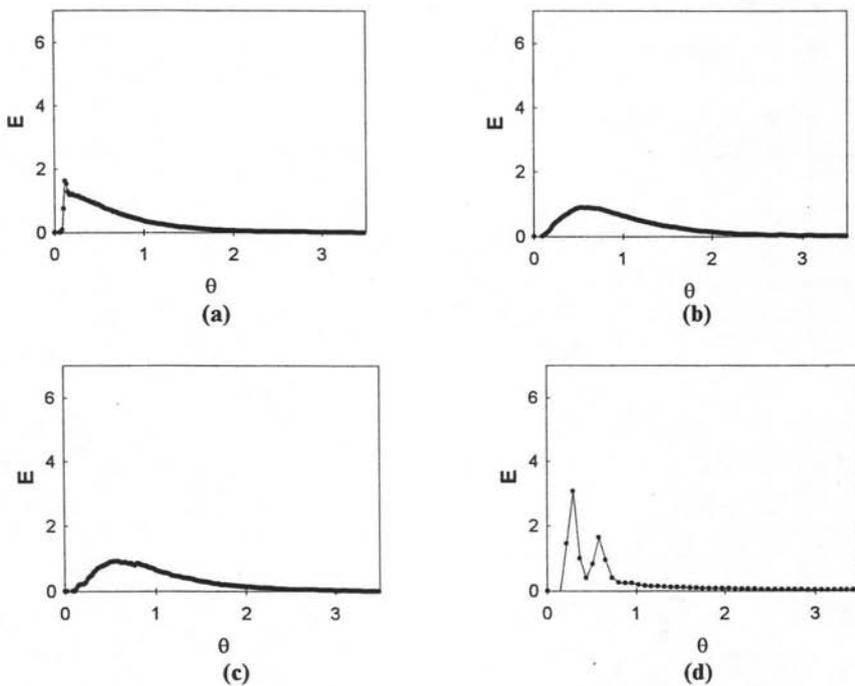
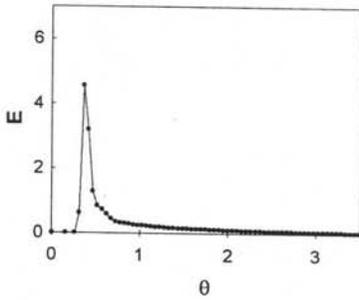
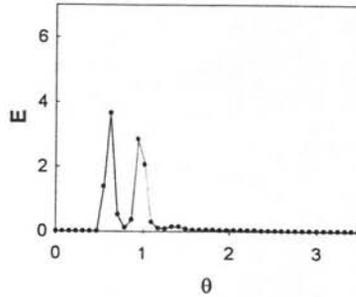


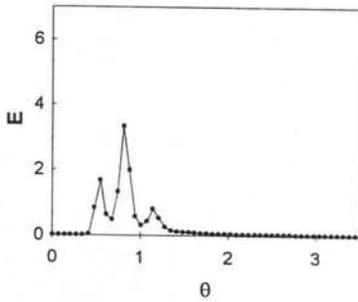
Figura 5.13 Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región media del modelo físico de tanque de temple operando a un flujo de entrada de 35 L/min: (a) zona 5, (b) zona 6, (c) zona 7 y (d) zona 8.



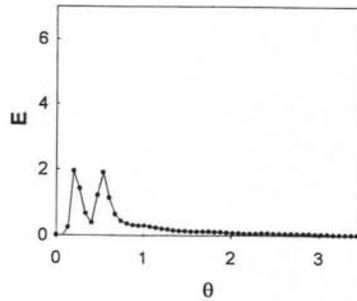
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.14 Curvas E de los experimentos en los que se registró la respuesta a un impulso de trazador en la región inferior del modelo físico de tanque de temple operando a un flujo de entrada de 35 L/min: (a) zona 9, (b) zona 10, (c) zona 11 y (d) zona 12.

Los tiempos medios de residencia determinados en las distintas zonas para un flujo de entrada de 35 L/min señalan que en la región inferior del tanque (zonas 9, 10, 11 y 12) la corriente de entrada experimenta una dispersión que mantiene un gran ímpetu provocando una corta permanencia del fluido. En la zona 8, a pesar de que la corriente fluye hacia arriba, el tiempo de residencia es corto puesto que el ímpetu del flujo de entrada es grande.

La región superior del tanque en particular las zonas 4, 3 y 2 presentaron tiempos de residencia similares, no así la zona 1 probablemente debido a una pérdida de ímpetu causada por el cambio de dirección del flujo y por la lejanía de la entrada.

La región central del tanque, (zonas 5, 6 y 7) al igual que para un flujo de entrada bajo, presentó tiempos de residencia altos debido al movimiento rotatorio de esta zona que impide una rápida salida del fluido (Fig. 5.15).

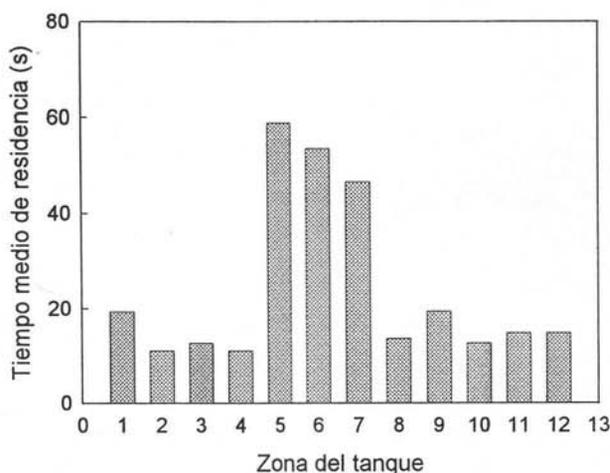


Figura 5.15 Tiempos medios de residencia medidos en las doce zonas del interior del tanque a flujo de alimentación de 35 L/min.

5.5 Efecto de un modificador de flujo en el patrón de flujo

Se implementó al modelo físico un modificador de flujo, con el fin estudiar su efecto sobre el patrón de flujo. El modificador es una placa de acrílico de 5 cm de altura, 10 cm de largo y fue colocada a 10.5 cm de la entrada con una inclinación de 120° . Como variantes se utilizaron dos distintas alturas del modificador (con respecto al fondo del modelo). Las pruebas fueron realizadas a flujos de entrada de 20 y 35 L/min.

5.5.1 Visualización del patrón de flujo

En esta sección se describen los patrones de flujo obtenidos en experimentos de visualización usando colorante como trazador.

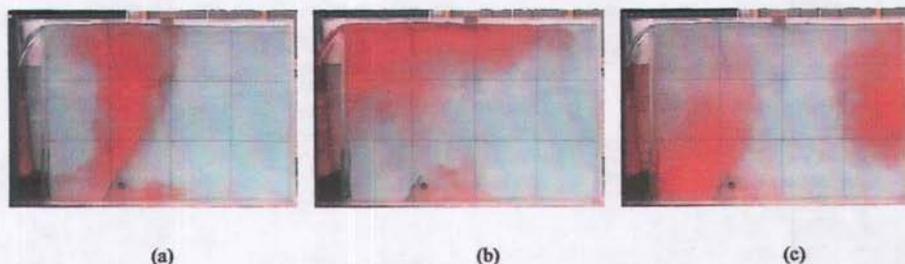


Figura 5.16 Fotografías del modelo físico de tanque de temple tomadas durante la prueba en la que se implementó un modificador de flujo de dimensiones 10x5 cm colocado a una distancia de la entrada de 10.5 cm, sin separación del fondo del modelo, y un ángulo de inclinación de 120° , el flujo de entrada fue de 35L/min con una entrada de trazador visual en impulso. Las fotografías corresponden a los tiempos (a) 1.72, (b) 2.82 y (c) 4.09 s después de la entrada del trazador.

El patrón de flujo del modelo físico que se obtuvo cuando se usó un modificador colocado sin separación del fondo del modelo ($H=0$ cm) se describe a continuación, ver Fig. 5.16: el fluido entra y al hacer contacto con el modificador, es desviado hacia la superficie del modelo físico (Fig. 5.16a) pasando por la zona 6; al llegar a la zona 2, prácticamente en la superficie, el fluido se divide dirigiéndose una sección hacia la salida del modelo, zona 1, y la otra en dirección contraria, zona 3, desplazándose por la zona superior (Fig. 5.16b).

Parte de la sección de fluido que se dirige hacia la zona 1 sale del modelo y la que no consigue salir describe un movimiento circular entre las zonas 1, 5 y 9 debido al impulso que le proporciona el fluido entrante que pasa por la parte baja de la zona 9, izquierda de la zona 10 y la zona 6. A pesar de que el movimiento es de alta velocidad en esta zona el fluido permanece por algunos ciclos de giro antes de abandonar el tanque.

El volumen del fluido que al dividirse se dirigió hacia la zona 3, también describe un movimiento rotatorio pero abarcando un mayor volumen (zonas 3, 4, 8, 12, 11, 10, 6 y 7) ver Fig. 5.16c. El impulso que recibe este fluido es proporcionado por el fluido que atraviesa la zona 6 y por el fluido entrante por la zona 3. El movimiento en esta región es más lento que el de la región cerca de la salida, de manera que después de dos ciclos de giro el trazador se mezcla con el fluido de mayor edad. La salida del fluido de esta región se da por el fluido que pasa por la zona 6, debido a que secciones de fluido al pasar por esta zona son atraídos por el impulso y lanzados fuera de esta región.

La única diferencia entre los patrones de flujo para flujos de entrada de 20 y 35 L/min es la velocidad a la que se desplaza el fluido en cada una de las regiones, siendo más lento para el flujo de entrada menor.

El patrón de flujo fue distinto cuando la altura a la que se colocó el modificador fue 0.5 cm ($H=0.5$ cm). Al implementar esta variante el fluido entra al tanque y al hacer contacto con el modificador es dividido en dos, una sección es desviada hacia la superficie y la otra sigue su camino por la periferia del modelo como sucede en ausencia de modificadores (Fig. 5.17a). El fluido desviado por el modificador se divide en dos al entrar a la zona 6: una sección del fluido hacia el centro del modelo en un movimiento circular entre la parte derecha de la zona 6 e izquierda de la zona 7.

La otra sección de fluido desviada en la zona 6 se dirige hacia la zona 1. Al entrar a esta zona el fluido se vuelve a dividir: una sección se dirige hacia la salida del modelo y la otra hacia la zona 5, formándose de nuevo un movimiento rotario entre las zonas 5, 9 y parte de las zonas 6 y 10 (Fig. 5.17b), esta vez el movimiento rotatorio abarca solo la parte baja de la zona 1, ya que la parte alta de esta zona forma una especie de acanalamiento por donde pasa fluido que fue desviado por el modificador y fluido proveniente de la región derecha del tanque.

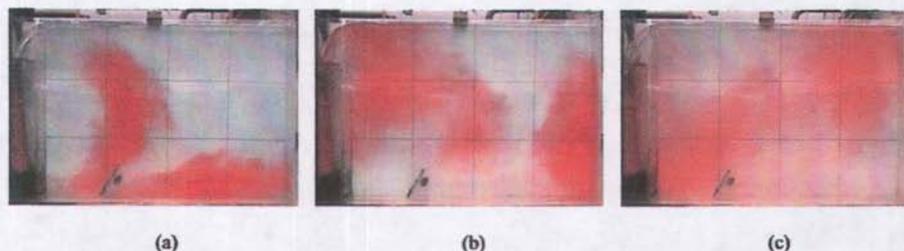


Figura 5.17 Fotografías del modelo físico de tanque de temple tomadas durante la prueba en la que se implemento un modificador de flujo de dimensiones 10x5 cm colocado a una distancia de la entrada de 10.5 cm, con una separación del fondo del modelo de 0.5 cm, y un ángulo de inclinación de 120°, el flujo de entrada fue de 35L/min con una entrada de trazador visual en impulso. Las fotografías corresponden a los tiempos (a) 1.25, (b) 2.72 y (c) 4.25 s después de la entrada del trazador.

El fluido que no fue desviado por el modificador sigue el movimiento por el fondo del tanque, la pared lateral del modelo y la superficie, es decir la parte baja de las zonas 10, 11 y 12, enteramente por las zonas 8 y 4. Al llegar al centro de la zona 3 el fluido se divide, una sección es atraída hacia la región izquierda del tanque dirigiéndose hacia la salida, pasando por la parte superior de las zonas 2 y 1. La otra sección de fluido se desplaza hacia la región central del modelo pasando por la sección izquierda de la zona 7 y dividiéndose al ingresar a la parte superior de la zona 11, una sección de fluido toma parte del movimiento circular del centro del modelo entre las zonas 6 y 7 descrito anteriormente. Mientras que la otra sección es impulsada por el fluido que pasa por la zona baja del tanque y vuelve a subir junto con esta corriente.

De la misma manera que para un modificador sin separación del fondo del modelo, la variación al operar el sistema a distintos flujos de entrada provoca solamente cambios en la velocidad a la que el fluido atraviesa el tanque.

5.5.2 Curvas RTD del modelo con modificadores

Las curvas de distribución de tiempos de residencia obtenidas de los experimentos en los que un modificador de flujo fue colocado en el modelo físico se analizan en las siguientes subsecciones. Además, se presentan las fracciones de flujo en pistón, en mezcla y volumen estancado calculadas.

5.5.2.1 Efecto de modificadores de flujo operando a flujo de entrada bajo (20 L/min)

Las curvas E de las pruebas de flujo de entrada de 20 L/min con modificador de flujo colocado a 10.5 cm de la entrada, con una inclinación de 120° y sin separación del fondo del tanque, además de estar muy cargadas hacia la izquierda con respecto al valor 1.0 de tiempo adimensional (θ) presentan tres picos de distintos tamaños. Además estos disminuyen gradualmente sin embargo las curvas siguen manteniendo una cola larga (Fig. 5.18). La primera característica mencionada indica que existe un gran volumen estancado ó un corto circuito en el sistema, y los picos de tamaños decrecientes indican una recirculación con un apreciable volumen de mezcla.

De acuerdo a las observaciones visuales la recirculación que indican las curvas es generada por el movimiento circular del fluido en la región izquierda del modelo físico, la curva esta recorrida hacia la izquierda no debido a un corto circuito sino a que en alguna parte del trayecto del fluido dentro del tanque el trazador toma dos caminos distintos, (zona 2) provocando que exista una mayor diversidad de tiempos de residencia. Así el fluido puede llegar rápidamente a la salida del tanque ó tardar mucho tiempo en salir del tanque.

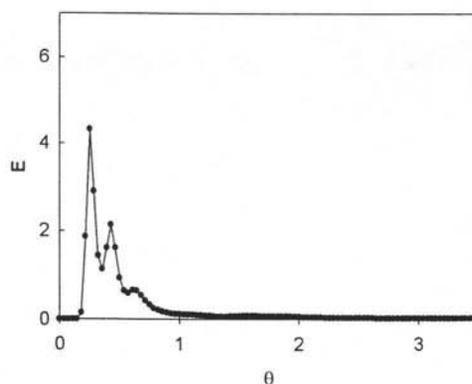


Figura 5.18 Curva E del experimento en la que se usó un modificador de flujo ubicado a 10.5 cm de la entrada con una inclinación de 120° sin separación del fondo del modelo físico, se utilizó trazador físico con entrada en impulso y un flujo de entrada de 20 L/min.

La morfología de las curvas obtenidas para las pruebas de modificador ubicado a 10.5 cm de la entrada con ángulo de 120° y con una separación del fondo del modelo de 0.5 cm a un flujo de entrada de 20 L/min (Fig. 5.19) es muy similar a la observada para las pruebas en las que no se usa modificador operando a un flujo de alimentación de 35 L/min (Fig. 5.5d), pero con un patrón de flujo muy distinto. La morfología se justifica recurriendo a los videos puesto que en estos es posible apreciar las grandes diferencias entre ambos comportamientos descritas en los patrones de flujo comentados anteriormente.

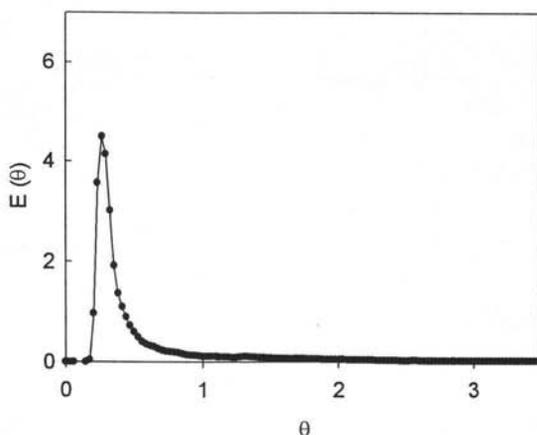


Figura 5.19 Curva E del experimento en el que se usó un modificador de flujo ubicado a 10.5 cm de la entrada con una inclinación de 120° con una separación del fondo del tanque de 0.5 cm, se utilizó trazador físico con entrada en impulso y un flujo de entrada de 20 L/min.

La descripción del nuevo patrón de flujo se confirma con la determinación de los tipos de flujo de la Fig. 5.20, donde se aprecia que al implementar modificadores de flujo, se consigue una disminución de casi 50 % del volumen en flujo pistón, un ligero incremento del volumen de mezcla, y un considerable aumento del volumen estancado. El incremento de este último se da casi en la misma proporción tanto en el caso en el que el modificador no está separado del fondo como cuando se tiene una altura de separación de 0.5 cm.

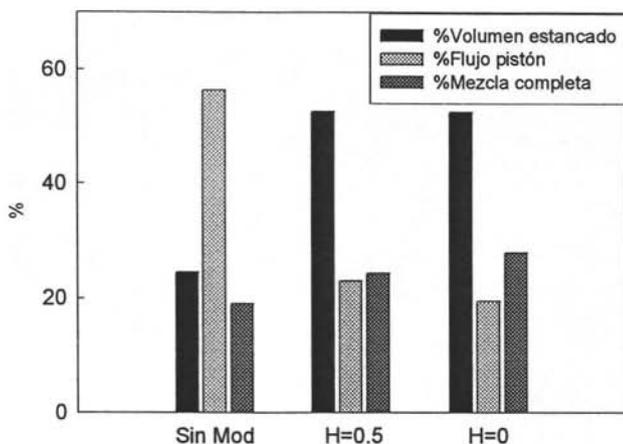


Figura 5.20 Variación de las fracciones de tipos de flujo en el modelo físico al implementar modificadores de flujo operando el sistema a flujo de entrada 20 L/min.

5.5.2.2 Efecto de modificadores de flujo operando a flujo de entrada alto (35 L/min)

Las curvas E obtenidas de las pruebas en las que se implementaron modificadores de flujo $H=0$ y $H=0.5$ cm, son similares entre sí pero presentan diferencias en cuanto a la morfología con respecto a las curvas de las pruebas en las que no se utilizaron modificadores. Además de estar ligeramente recorridas hacia la izquierda, las curvas presentan cimas de menor altura y mayor amplitud, pero al igual que en las pruebas sin modificadores, presentan una cola larga después del incremento de la concentración (Fig. 5.21).

Esta nueva morfología de las curvas se debe a que los modificadores ocasionan una gran desviación del flujo en pistón generando en el sistema un nuevo comportamiento en el que el volumen en flujo pistón se encuentra en menor proporción, el volumen en mezcla es mayor que sin el uso de modificadores y el volumen estancado permanece.

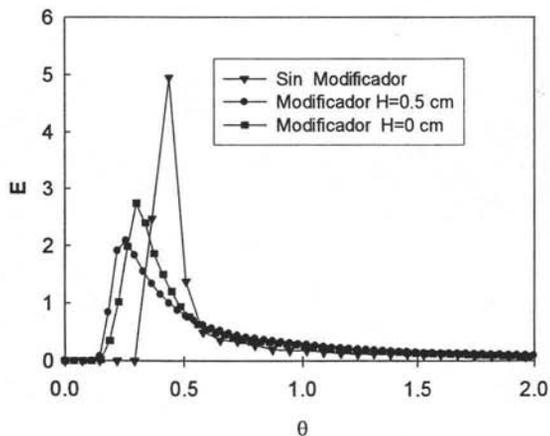


Figura 5.21 Curvas E de las pruebas en las que se implementó un modificador a 10.5 cm de la entrada con un ángulo de inclinación de 120° colocado a distintas alturas (H=0 y H=0.5 cm) del fondo del modelo físico, realizadas a un flujo de entrada de 35 L/min usando una entrada de trazador físico en impulso. También se grafica la curva E para el mismo flujo de entrada sin modificador de flujo.

Al igual que a flujos de entrada bajos, la respuesta en términos de las fracciones de los tipos de flujo al implementar modificadores fue una disminución importante del flujo en pistón, aumentos en el volumen de mezcla y estancado, siendo mas notorio el incremento de este último Fig. 5.22.

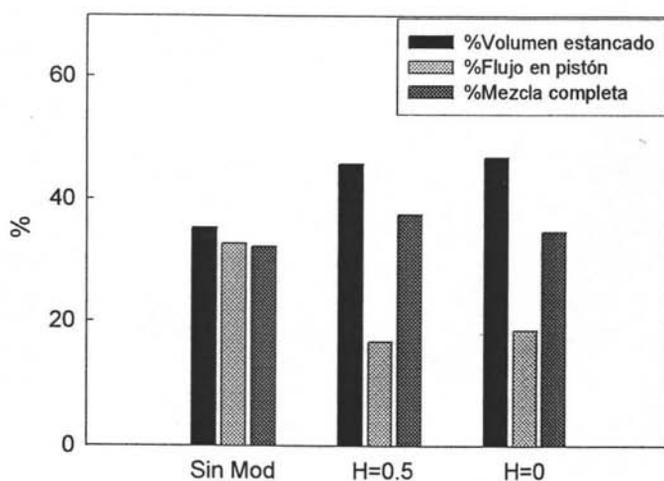


Figura 5.22 Variación de los tipos de flujo en el modelo físico al implementar modificadores de flujo operando el sistema a flujo de entrada 35 L/min.

6. Discusión de resultados

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

El cálculo de las fracciones de los tipos de flujo se realizó mediante una rutina desarrollada en *Sigma Plot*, utilizando operaciones de integración numérica aplicada a las curvas RTD. Los resultados también pudieron ser obtenidos mediante el software previamente mencionado (CAFLUR), sin embargo pruebas hechas a datos experimentales arrojaron resultados que no fueron acordes a lo observado en los videos de los experimentos en el modelo físico. Esto probablemente debido a que CAFLUR utiliza un método de obtención de las fracciones distinto al presentado en el capítulo de antecedentes. CAFLUR requiere que la curva $\ln I(\theta)$ vs θ sea continua, característica que no tenían todos los datos obtenidos mediante experimentación.

6.1 Efecto del flujo alimentado al tanque

Las curvas E que se obtuvieron a distintos flujos midiendo el potencial en la salida del modelo físico y la visualización del patrón revelan que existe una apreciable cantidad de flujo pistón para los distintos flujos de alimentación que se estudiaron. También se observaron recirculación de fluido y grandes volúmenes estancados.

Las diferencias en los resultados se aprecian al comparar las fracciones de los tipos de flujo, ya que estas varían de manera que los flujos de alimentación menores presentan mayor flujo pistón y los menores volúmenes estancados y de mezcla.

En la región central del modelo físico la velocidad a la que se desplaza es la más lenta de todo el sistema, ya que al ingresar el fluido al modelo físico este se desplaza cerca de las paredes del modelo en una trayectoria circular en la que se evita el centro del tanque. Sin embargo cuando el fluido ingresa en la región central el tiempo que necesita el fluido para abandonar el tanque es mayor (ver Fig. 6.1). Este comportamiento puede ser atribuido a las áreas de entrada y salida del tanque que en comparación con el gran volumen del contenedor, son muy pequeñas.

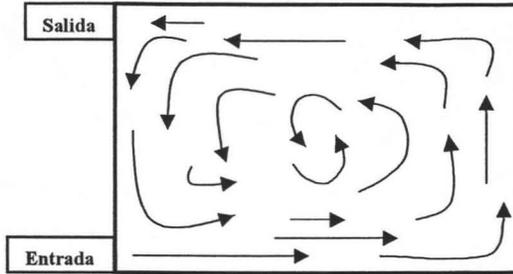


Figura 6.1 Patrón de flujo del modelo físico operando sin modificadores de flujo.

Los menores flujos de alimentación presentaron un mayor flujo en pistón debido a que evacuaron todo el trazador sin que este hubiera alcanzado un grado de mezcla grande y sin que paquetes de fluido se rezagaran. En cambio, los flujos de entrada altos generaron mayor agitación en el baño mezclando fluido de distintas edades dentro del modelo; además el mayor ímpetu de la corriente de entrada evitó que el fluido que se encontraba en la región central lograra salir de dicha zona y alcanzar la salida.

Las diferentes zonas del modelo presentaron distintos comportamientos. En general, las zonas de la periferia del modelo tuvieron un comportamiento de flujo en pistón y, las zonas de la región central del tanque mostraron comportamiento de flujo en pistón mas mezcla completa.

Al incrementar el flujo de entrada, el mayor ímpetu de la corriente transformó el comportamiento de la región baja del modelo propiciando que más zonas se comportaran en forma de flujo en pistón.

6.2 Efecto de un modificador de flujo

Las curvas E que se obtuvieron con la implementación de modificadores de flujo al modelo físico revelan que en comparación con el comportamiento sin uso de modificadores: el flujo en pistón disminuyó, el volumen estancado experimentó un gran aumento y el volumen de mezcla se incrementó ligeramente.

La reducción del flujo en pistón fue causada por la división del frente de fluido en ambas modalidades del modificador de flujo, ya que la división de las corrientes de entrada provocó una mejor mezcla de fluido fresco con el fluido de mayor edad dentro del modelo físico.

Al operar el modelo físico usando modificadores de flujo, las fracciones de los tipos de flujo obtenidas fueron similares al variar la altura a la que se colocó el modificador, sin embargo los patrones de flujo presentaron diferencias notorias principalmente en la zona posterior al modificador, donde el fluido ingresa de forma distinta de acuerdo a la altura a la que se colocó el modificador. Para el caso en el que el modificador de flujo fue colocado en el fondo del modelo el fluido ingresó a dicha región después de ser desviado por el modificador hacia la zona superior del tanque, es decir la entrada del fluido a la región posterior al modificador se dio por la zona 6. Esto generó un movimiento rotatorio del fluido (Fig. 6.2).

En cambio cuando la altura a la que fue colocado el modificador fue de 0.5 cm el fluido ingresó a la región posterior al modificador por dos zonas, una inferior (debajo del modificador) y una superior, la zona 6. Las diferentes corrientes de entrada generaron movimientos rotatorios por separado, cada una de menor volumen que en el caso del modificador en el fondo del modelo (Fig. 6.3).

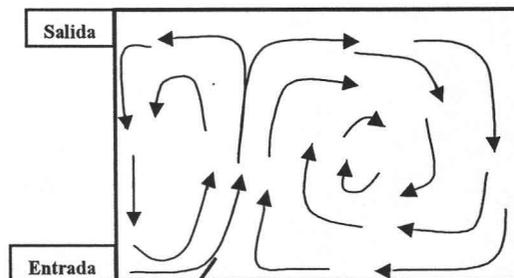


Figura 6.2 Patrón de flujo del modelo físico de tanque de temple usando un modificador de flujo colocado a una distancia de la entrada de 10.5 cm, sin separación del fondo del modelo físico, y un ángulo de inclinación de 120°.

Ambas modalidades de modificador generaron en la región anterior al modificador de flujo un movimiento rotatorio de velocidad mucho mayor a la del resto del tanque, esto fue reflejado en las fracciones de los tipos de flujo de manera que el volumen estancado alcanzó altas proporciones.

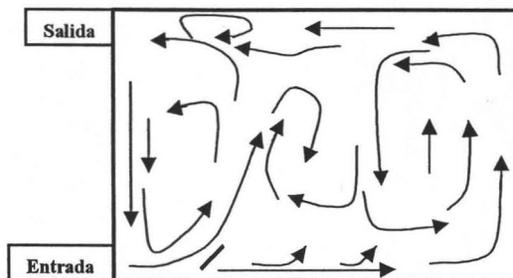


Figura 6.3 Patrón de flujo del modelo físico de tanque de temple usando un modificador de flujo colocado a una distancia de la entrada de 10.5 cm, con una separación del fondo del modelo físico de 0.5cm, y un ángulo de inclinación de 120°.

El cambio en el patrón de flujo y fracciones de tipo de flujo fue mucho más notorio al operar el modelo físico usando modificadores que al variar el flujo de entrada. Puesto que se generaron varias corrientes propiciando un aumento en el volumen estancado y disminución del flujo pistón principalmente.

Una agitación uniforme en la superficie de las piezas durante el temple es lo más deseable en un tanque de temple [1]. Considerando las condiciones simuladas durante este estudio, un flujo de alimentación bajo y sin uso de modificadores proporciona una alta fracción de flujo en pistón y un volumen estancado menor, lo cual podría ser lo más adecuado para favorecer el temple puesto que en estas condiciones las piezas de acero estarían el menor tiempo en contacto con fluido de mayor edad y el contacto con fluido de menor edad ó fresco sería mayor. Esto beneficia al proceso puesto que el fluido no se calentaría tanto como puede ocurrir si el fluido permanece más tiempo dentro del tanque. Aunque por otra parte la rapidez de enfriamiento de las piezas de acero está ligada a la velocidad del medio de enfriamiento, consideración que propone un flujo de alimentación alto como el más apropiado.

El uso de modificadores ayudó a re-direccionar el flujo, lo que comúnmente se utiliza en los tanques industriales para dirigir el flujo hacia las piezas a templar. Tomando en consideración que un modificador generó una zona de alta velocidad del fluido y una de menor velocidad, el arreglo de una cortina de modificadores deberá generar las corrientes suficientes y distribuir las de manera que el mismo flujo llegue a las diferentes secciones del tanque de temple.

Modificar el diseño del tanque en especial el tamaño y/o geometría de la salida ó implementar salidas alternas podría cambiar la fracción de volumen estancado, esto considerando que una de las causas por las que se generan volúmenes muertos es que las áreas de entrada y/o salida son pequeñas con relación al volumen del tanque [8], como es el presente caso. Se buscaría modificar la salida de manera que al incrementar el flujo de alimentación al tanque el volumen estancado no aumente, con lo que se podría favorecer que el medio de enfriamiento permanezca el menor tiempo dentro del tanque y se produzca una óptima extracción de calor de las piezas.

La aplicación conjunta de la técnica de visualización así como de curvas RTD evitó confusiones cuando distintas condiciones de operación generaron curvas E similares como fue el caso de: flujo de entrada de 35 L/min sin modificador de flujo y flujo de entrada de 20 L/min con modificador de flujo colocado a una distancia de 0.5 cm del fondo del modelo. Donde principalmente la visualización de los patrones de flujo reveló que el comportamiento del fluido fue muy distinto en cada caso.

7. Conclusiones

- La aplicación de técnicas de visualización y curvas RTD fue utilizada con éxito para caracterizar la hidrodinámica de un tanque de temple en un modelo físico.
- La conjunción de las técnicas mencionadas en el punto anterior es de gran importancia para una mejor caracterización de sistemas hidrodinámicos.
- El patrón de flujo del modelo físico de un tanque de temple, sin modificadores de flujo, describe un movimiento circular paralelo a las paredes del tanque; una parte del fluido alcanza a salir en un primer ciclo y el restante describe el mismo movimiento de nuevo varias veces. La región central se considera una zona de volumen estancado ya que el fluido que ingresa a esta región permanece dentro del tanque un tiempo mucho mayor que el fluido circulante por la periferia del tanque.
- El volumen estancado dentro del modelo físico aumenta a expensas del volumen de flujo en pistón a medida que se incrementa el flujo de entrada.
- Existen zonas dentro del tanque con distintos comportamientos de fluido. Es posible alterar su comportamiento modificando el flujo de entrada.
- Un modificador de dimensiones 10 x 5 cm colocado a 10.5 cm de la entrada con un ángulo de inclinación de 120° y sin separación del fondo del modelo altera el patrón de flujo generando dos zonas de movimiento circular de distintas velocidades.
- Separar 0.5 cm del fondo el modificador de flujo de las mismas dimensiones y ángulo de inclinación genera un patrón de flujo en el que también existen dos zonas: una región presenta un movimiento circular de gran velocidad y otra región donde existen corrientes que fluyen en distintas direcciones.
- El uso de cualquiera de los modificadores de flujo implementados en este estudio cambia de manera drástica el patrón de flujo, provocando que la fracción de volumen estancado sea mayor que la observada cuando no se usan modificadores, a la vez que provocan una disminución del flujo en pistón.
- La información generada del comportamiento del modelo físico del tanque de temple puede ser utilizada para la validación de un modelo matemático que describa el comportamiento de un tanque de temple.

Bibliografía

1. G. E. Totten, C. E. Bates y N. A. Clinton: Handbook of Quenchants and Quenching Technology, ASM International U.S.A. (1993)
2. J. Szekely, J.W. Evans y J.K. Brimacombe: The Mathematical and Physical Metals Processing Operations, Wiley Interscience and John Wiley and Sons, U.S.A. (1988)
3. N. Bessho, R. Yoda, H. Yamasaki, T. Fujii, T. Nozaki y S. Takatori: "Numerical Análisis of Fluid Flow in Continuous Casting Mold by Bubble Dispersión Model", *ISIJ International*, Vol. 31 (1991) 40-45
4. J. Kurobe, M Iguchi, S. Matsubara, K. Nayamoto y Z. Morita: "Cold Model Experiment on Fluid Flow Phenomena in Hot Dip Plating Bath", *ISIJ International*, Vol 36 (1996) 438-443
5. S. Singh y S.C. Koria: "Physical Modelling of Steel Flow in Continuous Casting Tundish", *Iron and Steelmaking*, Vol. 20 (1993) 221-230
6. J. H. Wei, J.C. Ma, Y.-Y. Fan, N.-W. Yu, S.-L. Yang, S.-H. Xiang y D.-P. Zhu: "Water Modeling Study of Fluid Flow and Mixing Characteristics in Bath During AOD Process," *Ironmaking and Steelmaking* Vol. 26 (1999) 363-371
7. O. Levenspiel: El Omnilibro de los Reactores Químicos, Reverté, España, (1985)
8. J. Szekely y N. J. Themelis: Rate Phenomena in Process Metallurgy, Wiley-Interscience U. S. A. (1971)
9. O. Levenspiel: Chemical Reaction Engineering, John Wiley and Sons, Inc. New York, (1972)
10. Y. Sahai y T. Emi: "Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes", *ISIJ International*, Vol. 36 (1996) 667-672
11. G. Solorio: Control de la turbulencia y flujo del acero líquido en un distribuidor de colada continua mediante la buza de alimentación, Tesis de Doctorado IPN México D.F., (2004)
12. D.M. Himmelblau y K.B. Bischoff: Análisis y simulación de procesos, Reverté, México, (1976)
13. Robbins: Iones en solución: Introducción a la electroquímica, El manual moderno, México D. F., (1978)
14. A. Kapoor y G. A. Irons: "A Physical Modeling Study of Fluid Flow Phenomena in Gas Slag Systems", *ISIJ International*, Vol. 37 (1997) 829-938

Apéndice

Sensibilidad del análisis de datos

Debido a que al final de algunas pruebas experimentales la lectura de potencial no regresaba al valor inicial, se realizó una prueba para averiguar el efecto de no contar con una curva completa sobre los resultados del análisis de datos. Para esto, se realizaron cortes (para eliminar datos artificialmente) en la curva de una prueba en la que la respuesta logró alcanzar el valor inicial de potencial (Fig. A-I).

El criterio de corte se determinó usando como 100% la altura de la respuesta, y los cortes de los datos se realizaron en los puntos de la curva que correspondieron a 5 y 10% de la altura de la curva. Estas alturas corresponden aproximadamente a las alturas a las que la respuesta se estabilizaba en las pruebas en las que no se alcanzó el valor inicial de potencial.

Con estos diferentes porcentajes de curva se determinaron los tipos de flujos, áreas bajo la curva, tiempos medios de residencia y varianzas (tabla A-I). Al compararlos, se observó que las pruebas en las que no se alcanzó un valor inicial de potencial proporcionan datos similares a los obtenidos al usar todos los datos de las pruebas.

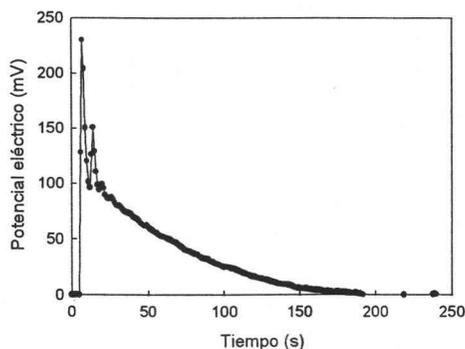


Figura A-I Curva de potencial-tiempo de la que se tomaron los datos para la prueba de sensibilidad del análisis. La curva se obtuvo de la medición en la salida de un trazador físico, sin uso de modificador y a un flujo de entrada de 25 L/min.

Tabla A-I Datos de tipos de flujo al usar distintos porcentajes de datos de la misma prueba, obtenida por medición en la salida del modelo a un flujo de entrada de 25 L/min.

% de altura de la curva removido	% Vd	%Vp	%Vm	Área	Tiempo medio de residencia	Varianza
0 (curva completa)	22.64	54	23.36	0.000885	13.23	0.836
5	20.45	55	24.55	0.000883	12.89	0.613
10	19.07	56	24.93	0.000880	12.62	0.485
Promedio	20.72	55	24.28	0.00883	12.91	0.640
Desviación estándar	1.80	1.00	0.819	2.5E-6	0.305	0.177