



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

"CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO MULTIFÁSICO EN EL HORNO ELÉCTRICO DE ARCO"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A :

HECTOR JAVIER VERGARA HERNÁNDEZ



MEXICO, D. F.



**EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA**

2001

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente Prof. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES
Vocal Prof. CARLOS GONZALEZ RIVERA
Secretario Prof. MANUELA DIAZ CRUZ
1er Suplente Prof. JOSE ANTONIO BARRERA GODINEZ
2º Suplente Prof. MARTIN RIVERA TOLEDO

Sitio donde se desarrolló el tema:

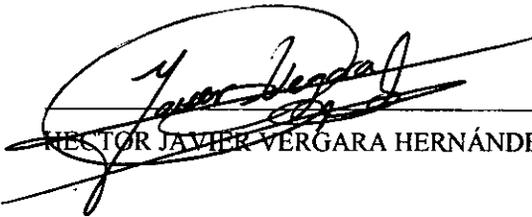
EDIFICIO "Z", LAB. de MODELACIÓN FÍSICA, E.S.I.Q.I.E., I.P.N.

Asesor del tema:



DRA. MANUELA DÍAZ CRUZ

Sustentante:



HECTOR JAVIER VERGARA HERNÁNDEZ

Dedico este trabajo de tesis a:

A la mujer que me arrullo en sus brazos y me envolvió en sus besos
la que con su sangre me dio vida
la que me dio en pedazos, uno por uno, el corazón entero.

¡ Por mi madre ausente!
María de Jesús Hernández Escamilla

A un hombre imprescindible en mi vida, a quien admiro, amo y respeto;
gracias por guiarme exitosamente en la vida profesional y personal
los cuidados y desvelos no fueron en vano.

¡ Por mi padre!
Ing. Bonifacio Vergara Gayosso

A dos personas que pocas veces les he dicho cuantos los quiero.

¡Mis hermanos!
Esmeralda Vergara Mendoza
Edgar Vergara Hernández

A una mujer que me enseñó lo que vale el cariño profundo y verdadero.

¡ Mi tía!
Teresa García Ortíz

A un hombre que siempre estuvo pendiente de sus sobrinos, muchas gracias.

¡Mi tío!
Ing. Honorio Hernández Escamilla

A una mujer inteligente y muy especial.

Ing. Verónica Martínez Flores

A la Dra. Manuela Díaz Cruz por su apoyo y paciencia.

Al Dr. Jorge Palafox Ramos por sus conocimientos brindados y su valiosa ayuda profesional.

A mis amigos, a los profesores y todas aquellas personas que participaron en este importante paso de mi vida, muchas gracias.

Contenido

1	Introducción	1
2	Antecedentes	3
2.1	Modelos de balance de población	3
2.2	Tiempo de Mezclado (τ_{mez})	6
2.3	Medición del Tiempo de mezclado	7
3	Objetivo	10
4	Procedimiento experimental	11
4.1	Construcción del modelo	11
4.2	Técnica estímulo-respuesta	12
4.3	Construcción de curvas adimensionales	16
5	Resultados y Discusión de resultados	17
6	Conclusiones	34
	Bibliografía	35

Capítulo 1

Introducción

El uso de argón para agitar el acero fundido en hornos de arco eléctrico, es un ejemplo del progreso que la industria siderúrgica ha tenido en las dos últimas décadas [1]. La agitación puede incrementar la velocidad de transferencia de masa, además de promover altas velocidades de transferencia de calor. Para aceros inoxidables y aceros aleados donde el cromo, níquel y otros elementos de aleación son altamente reactivos, la inyección de argón por el fondo es una herramienta fundamental [2].

La tesis tiene el objetivo de estudiar los fenómenos hidrodinámicos de la inyección de gases por el fondo en un reactor. Como analogía a un Horno de Arco Eléctrico, se llevan a cabo pruebas en un modelo físico de agua escala 1:10. El desarrollo experimental consiste básicamente en medir el tiempo de mezclado mediante la dispersión de trazador en el modelo físico, usando la técnica de conductividad eléctrica [3], [4].

En la mayoría de los trabajos, [3], [5], [6], [7], la posición de la tobera en el fondo de los recipientes se dispone en el centro ($r/R = 0$), o a una relación r/R intermedia.

Este trabajo propone utilizar tres toberas, dispuestas en un arreglo triangular de

relación $r/R = 0.53$.

Los fenómenos hidrodinámicos que ocurren en la operación de mezclado se caracterizan en términos de la distribución del tiempo de residencia (RTD) del fluido [8]. Se determinó la influencia que tiene la velocidad de flujo de aire, en valores de $1-35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$, la influencia del diámetro de tobera en 1 y 2 mm y la altura de baño líquido en 0.10 y 0.20 m.

Cuando se insufla gas a través de toberas sumergidas, se observan comportamientos muy diferentes dependiendo de si se trabaja a altas o bajas velocidades de flujo de gas. A elevadas velocidades de flujo de gas, se forma un chorro más o menos continuo, mientras que a baja velocidad de flujo se observa la formación de burbujas discretas.

La agitación de un líquido en un reactor equipado con toberas en el fondo, producirá al baño un movimiento y la formación de remolinos (eddies) a escala muy fina en el fluido. En el caso de agitación de líquidos de baja viscosidad, como el agua, el flujo es altamente turbulento, con intensidades de turbulencia de rangos de cero en zonas muertas hasta cien por ciento o mayores cerca de las toberas (fluido con efecto de cortocircuito).

Capítulo 2

Antecedentes

2.1 Modelos de balance de población

La aplicación de los principios de balance de población a las características del flujo y mezcla en reactores agitados fue establecida por Danckwerts [9], quien definió ciertas funciones de distribución para los tiempos de residencia de los elementos de fluido en un reactor.

Los modelos de balance de población, que representan lo que se conoce como macromezcla son con frecuencia herramientas de gran utilidad para dar una adecuada estimación del comportamiento del proceso.

El comportamiento real de reactores puede ajustarse a dos tipos de flujos ideales [10], tal como se muestra en la figura 2.1. El primero de los dos tipos de flujos ideales representado en la figura 2.1(a), se conoce con diferentes nombres: reactor de flujo en tapón, de flujo en pistón, de flujo tubular ideal, y de flujo uniforme.

Se caracteriza por ser un flujo ordenado, sin que ningún elemento del mismo

sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquel; en realidad, en este reactor puede haber mezcla lateral de fluido, pero nunca ha de existir mezcla o difusión a lo largo de la trayectoria de flujo. La condición necesaria y suficiente para que exista flujo en pistón es que el tiempo de residencia en el reactor sea el mismo para todos los elementos de fluido.

Si V es el volumen del reactor, y v es el flujo volumétrico entrante al reactor, entonces para condiciones de flujo incompresible en estado estable, el tiempo promedio consumido por el fluido dentro de un reactor esta definido como:

$$\bar{t} = \frac{V}{v} \quad (1)$$

donde \bar{t} también es el tiempo nominal de residencia del fluido dentro del reactor.

El otro flujo ideal, figura 2.1(b), se denomina mezcla completa y como su nombre lo indica, es el reactor en el que su contenido está perfectamente agitado, y su composición en cada instante es la misma en todos los puntos del reactor. Por consiguiente la corriente de salida de este reactor tiene la misma composición que la del fluido contenido en el mismo.

Aunque el comportamiento real de los reactores nunca se ajusta exactamente a estas situaciones idealizadas, en muchos casos se aproxima tanto a estas condiciones que podemos admitir este comportamiento ideal sin recurrir en error apreciable. Sin embargo, en otros casos las desviaciones pueden ser muy grandes y originarse por formación de canalización de flujo "cortocircuito" o por formación de zonas estancadas, también llamadas espacios muertos en el reactor [11].

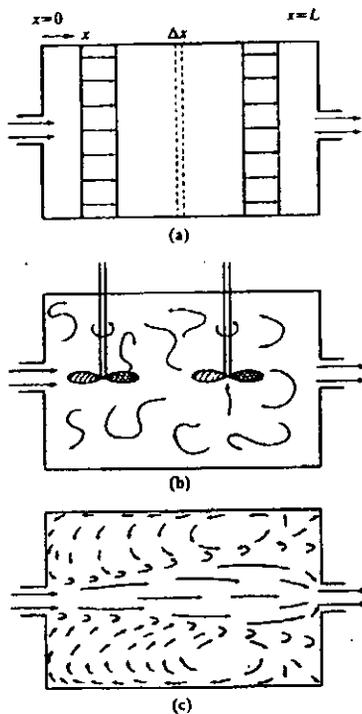


Figura 2.1: Tanque de flujo continuo que exhibe (a) flujo pistón, (b) mezcla perfecta, (c) características intermedias

Un ejemplo de estas desviaciones puede observarse en la figura 2.1(c), donde una gran cantidad del flujo que entra al reactor se cortocircuita, asemejándose a un flujo en pistón saliendo de manera recta. El remanente alcanza un modelo de flujo recirculatorio, característico de una mezcla completa. En las esquinas del reactor se generan espacios muertos con tiempos de residencia muy prolongados.

Los modelos más sencillos del diseño de equipo se basan en estos dos conceptos abstractos del flujo ideal.

Se puede caracterizar un reactor en términos de desviaciones de cortocircuito o formación de espacios muertos. Para ello se requiere saber más acerca del tiempo de residencia del fluido que entra al reactor.

2.2 Tiempo de mezclado (τ_{mez})

El τ_{mez} es definido como el intervalo de tiempo requerido para considerar la homogeneidad del baño en composición química y temperatura, después de haber adicionado un trazador.

Nakanishi et al. [7] ha sido el primero en introducir el concepto de tiempo de mezclado para evaluar las características de mezclado en procesos siderúrgicos y obtener una relación cuantitativa entre el tiempo de mezclado (τ_{mez}) y la energía de agitación introducida al baño líquido ($\dot{\epsilon}$). Algunos autores [4], [12] reportan esta relación empírica de la forma:

$$\tau_{mez} = A\dot{\epsilon}^{-B} \quad (2)$$

donde A y B son constantes que dependen de la naturaleza del proceso.

El τ_{mez} , es un parámetro que representa cuantitativamente el mezclado en operaciones de procesamiento de acero y puede determinarse de manera fácil bajo estudios de macromezcla, utilizando el método experimental estímulo-respuesta [10].

La figura 2.2 muestra la inyección de un trazador a un reactor agitado con una propela. La variación de concentración del trazador se detecta en el punto A. Una concentración C_{∞} , puede ser tomada como un valor de equilibrio, tal como se observa

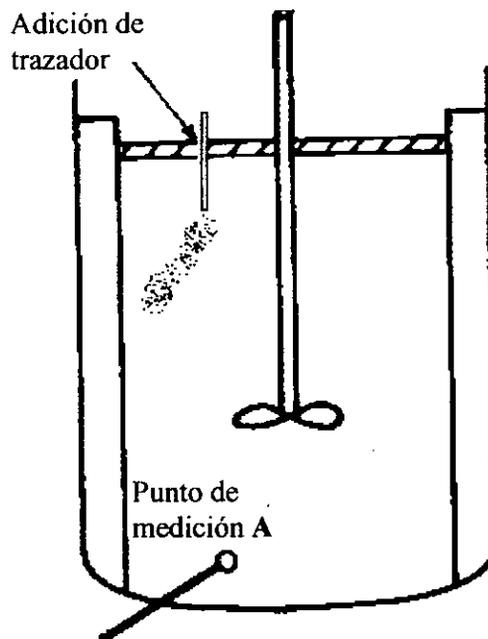


Figura 2.2: Inyección del trazador en un tanque agitado

en la figura 2.3. Sin embargo, el punto final para considerar la homogeneidad del baño, es muy difícil de presizar [13].

2.3 Medición del Tiempo de mezclado

El τ_{mez} en reactores con agitación se determina usualmente mediante técnicas de trazador [13]. Estas técnicas miden macromezclas, es decir, pueden ser usados para medir el tiempo que toma lograr un grado dado de homogeneidad.

La concentración del trazador es medida con respecto a un tiempo en un punto

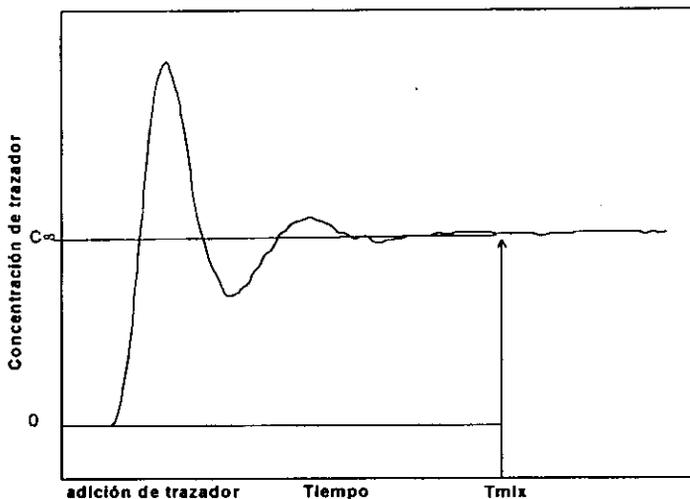


Figura 2.3: Curva concentración-tiempo típica en los experimentos estímulo-respuesta dentro del reactor (Punto A). El τ_{mez} es considerado como el tiempo en el cual la concentración del trazador, C , en la posición de medida ha alcanzado o se ha aproximado, a la concentración promedio esperada del trazador, \bar{C} . Si no hay inicialmente trazador en el reactor, entonces τ_{mez} , puede ser definido como:

$$\frac{|C - \bar{C}|}{\bar{C}} = m \quad (3)$$

donde m es el máximo valor absoluto aceptable de la desviación relativa de el τ_{mez} :

Al inicio del proceso de mezclado, $m = 1.0$, y cuando la homogeneización ha sido completada, $m = 0$. En la mayoría de los estudios ([13] por ejemplo) el τ_{mez}

se considerado al 95%, t_{95} , es decir desde el tiempo de adición del trazador hasta el tiempo donde $m = 0.05$. Una desviación del 5 % de acuerdo a la uniformidad en el baño es aceptada para la determinación del tiempo de mezclado [10]. Este es probablemente el valor más bajo de m , para el cual el tiempo de mezclado puede ser fácil y acertadamente medido.

Capítulo 3

Objetivo

Objetivo General:

Caracterizar los fenómenos hidrodinámicos que ocurren en el baño de un horno de arco eléctrico con inyección sumergida.

Objetivos específicos:

Determinar el tiempo de mezclado en función de:

La velocidad de flujo de aire.

Diámetro de la tobera.

Altura de baño líquido.

Capítulo 4

Procedimiento experimental

4.1 Construcción del modelo

El equipo experimental se muestra en la figura 4.1 . El modelo físico consiste de un reactor cilíndrico de acrílico con una altura de 0.51 m y diámetros interno y externo de 0.49 m y 0.51 m, respectivamente. En el fondo del recipiente, tal como se ilustra en la figura 4.2, se ranuraron tres orificios en forma de delta . Estos se adaptan, de tal manera, que tres toberas son instaladas. Por medio de una compresora se insufla aire al modelo físico.

El tiempo de mezclado fue medido por medio de un método de conductividad eléctrica. El electrodo para la medición de la conductividad de la solución se colocó en la pared del recipiente a una altura de 0.05 m a partir del fondo del recipiente(figura 4.1).

La señal eléctrica producida por la celda de conductividad es registrada por una computadora haciendo uso de software Labview versión 5.1. El tiempo de respuesta

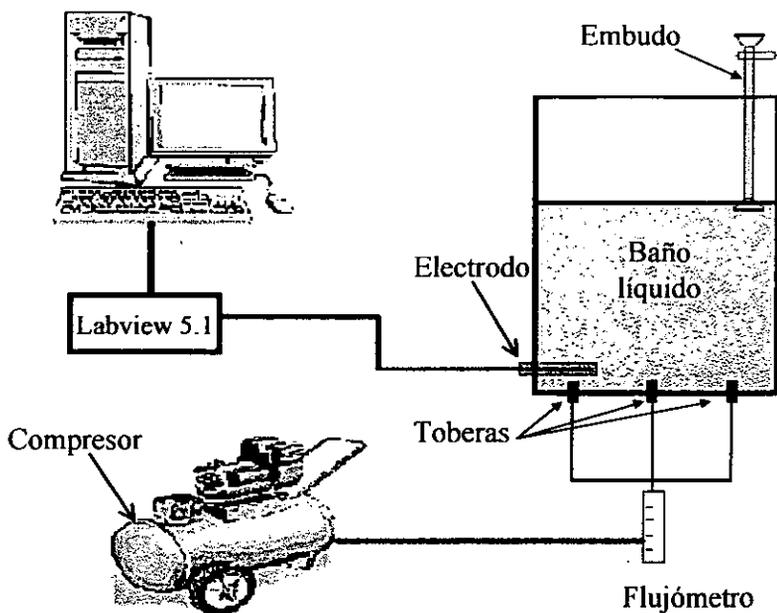


Figura 4.1: Equipo experimental

del sistema se evaluó en no más de dos segundos. Para compensar el incremento de señal de salida después de la adición de trazador, se usa una unidad de voltaje de referencia.

4.2 Técnica de estímulo-respuesta

Para el estudio del tiempo de mezclado o “macromezcla” se utiliza la técnica de estímulo-respuesta. Esta técnica consiste en inyectar un trazador en escalón, la respuesta indicará, en conjunto, el comportamiento del trazador en el reactor.

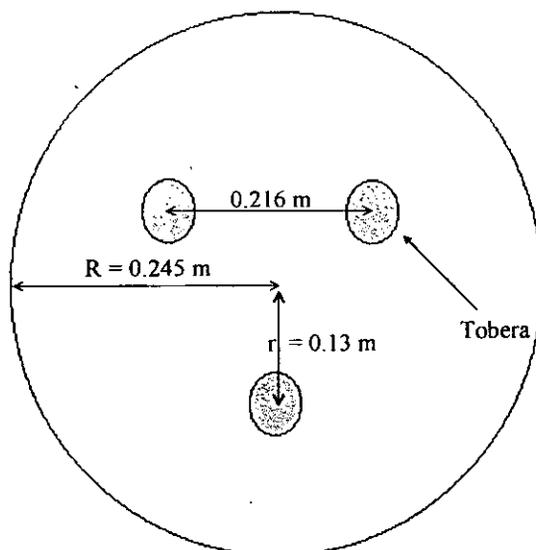


Figura 4.2: Posición de las toberas en el fondo del reactor (Vista superior).

Una solución de KCl 2N se utiliza como trazador.

Para minimizar la dispersión del trazador en la determinación del tiempo de mezclado, se adiciona el trazador en la superficie del baño en movimiento mediante un embudo (figura 4.1), el cual se sumerge en el baño aproximadamente 1 cm, a una distancia máxima en relación con la celda de conductividad eléctrica. Se inyecta 6 ml y 12 ml de KCl 2N para alturas de baño de 0.10 y 0.20 m, respectivamente. Esto con la finalidad de mantener constante la composición química del trazador en el baño líquido.

Calibración de los equipos de medición

Cada flujómetro es calibrado utilizando el siguiente procedimiento:

- Llenar con agua una probeta de 2 litros y sumergir en una tina, de tal forma que la boca de la probeta quede dentro del agua.
- Cuidar que dentro de la probeta no quede aire atrapado.
- Conectar un flujómetro como se muestra en la figura 4.3
- Permitir el paso de aire y seleccionar una primer escala de medición; en el experimento, se midieron los flujos de 1, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30 y $40 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$.
- Con un cronómetro, medir que volumen de agua se desplaza en un periodo de tiempo
- Realizar 5 veces la prueba, y obtener un promedio de los resultados
- Obtener una curva de calibración para cada flujómetro.

Para la calibración del equipo de medición de conductividad se realiza el siguiente procedimiento:

- Preparar una solución 2N de KCl
- Llenar con un litro de agua un matraz
- Dejar unos minutos el agua con agitación magnética y medir la conductividad.
- Con propipeta agregar 1 ml de KCl y medir la conductividad
- Esperar algunos minutos para que la solución se homogenice
- Repetir el paso 4 y 5, hasta que la medición de mV se sature

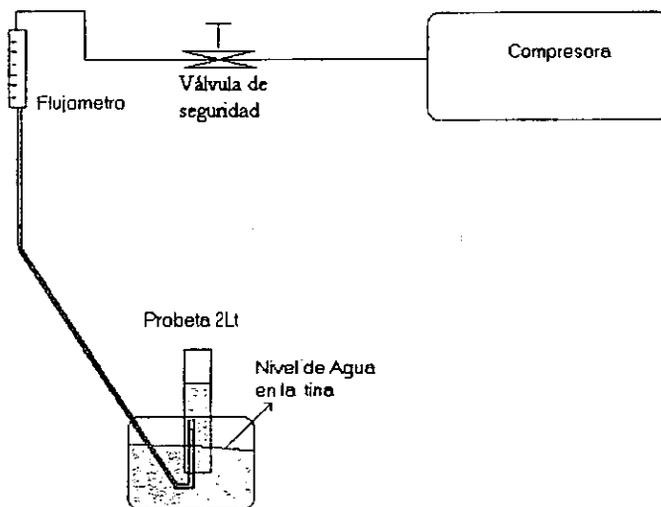


Figura 4.3: Arreglo utilizado para la calibración de flujómetros

- Con las curvas de calibración pasar de una curva mV-tiempo a una curva Concentración-tiempo

De acuerdo a la Tabla 1, se harán pruebas para obtener 32 curvas concentración-tiempo; cada una de ellas con 5 repeticiones, para minimizar errores de medición.

Tabla 1. Condiciones experimentales	
Diámetro de tobera, d_T ($\times 10^{-3}m$)	2,3
Altura de baño (m)	0.10,0.2
Flujo de aire, $\times 10^{-3}(m^3/min)$	1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35

4.3 Construcción de curvas adimensionales

Las obtención de curvas adimensionales ayuda a encontrar las características de distribución del tiempo de residencia de un fluido que ha pasado por espacios muertos o de cortocircuito.

Una explicación exhaustiva de la interpretación y la construcción de la curva adimensional concentración-tiempo, se puede encontrar en trabajos de Himmelblau y Bischoff [9].

Capítulo 5

Resultados y Discusión de

Resultados

En la figura 5.1 se muestra los resultados originales de la curva mV-tiempo para una prueba con tobera de 2 mm diámetro, un flujo de gas insuflado de $35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ y una altura de baño líquido de 0.10 m.

Sobre la curva se puede observar el cálculo de τ_{mez} al 95% que de acuerdo a la ecuación 3, se obtiene cuando $m = 0.05$.

El mismo principio se utilizó para calcular los valores de τ_{mez} para las 32 curvas experimentales mV-tiempo.

La figura 5.2 muestra el efecto de la variación del flujo de aire insuflado y diámetro de tobera sobre el tiempo de mezclado.

Las condiciones del experimento fueron: agitación del baño insuflando aire por el fondo a razón de 1 a $35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$, toberas de 2 y 3 mm de diámetro y altura de baño de 0.10 m.

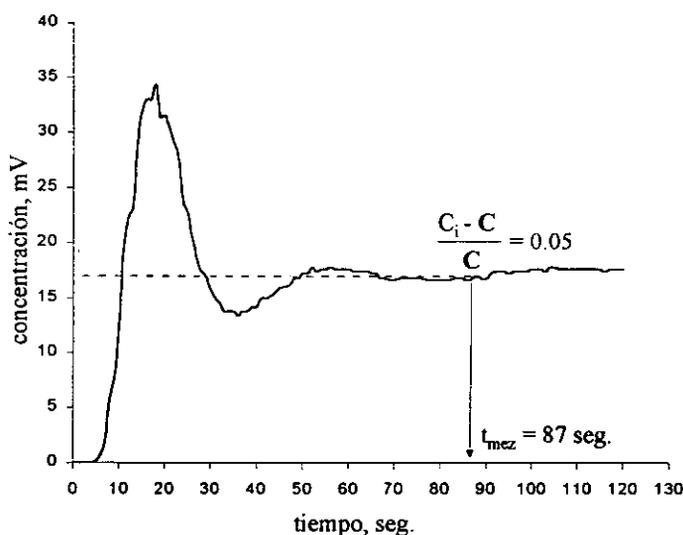


Figura 5.1: Muestra el cálculo de τ_{mez} , considerado como el momento en el cual la concentración del trazador al tiempo i , C_i , se ha aproximado a la concentración promedio esperada del trazador, C .

Los valores obtenidos para ambos diámetros de tobera antes de los $20 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$, muestran que el τ_{mez} disminuye con el aumento de flujo de aire; resultados similares están publicados en [4-6, 14].

Para ambas toberas después de los $20 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$, el τ_{mez} se incrementa por efecto de la coalescencia, siendo más distintivo en la tobera de 2 mm de diámetro.

La figura 5.3 muestra el efecto de la variación del flujo de aire insuflado y el diámetro de tobera sobre el tiempo de mezclado, para una altura de baño de 0.20 m.

Las condiciones del experimento fueron: agitación del baño insuflando aire por el fondo a razón de 1 a $35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$, toberas de 2 y 3 mm de diámetro y una

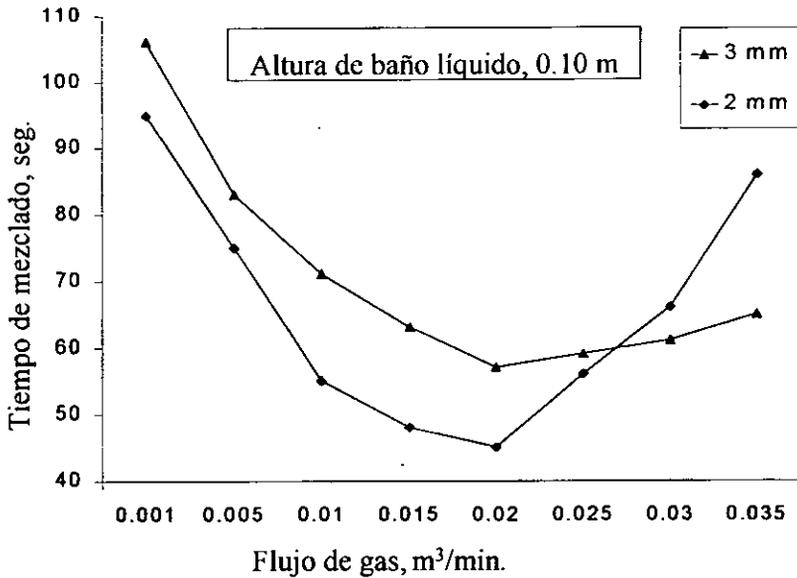


Figura 5.2: Efecto de la variación de flujo de aire insuflado y diámetro de tobera, sobre el tiempo de mezclado.

altura de baño de 0.20 m.

En la figura 5.3 se observa que el τ_{mez} disminuye nuevamente con el aumento de flujo de aire. Sin embargo, a flujos mayores a $25 \times 10^{-3} m^3/min$. τ_{mez} tiende a mantenerse constante.

Una comparación entre las figuras 5.2 y 5.3 muestra que la altura del baño tiene un efecto notable en el τ_{mez} . El tiempo de mezclado disminuye substancialmente al incrementarse la altura del baño. Con respecto a las toberas, a menor diámetro se obtienen los menores tiempos de mezclado.

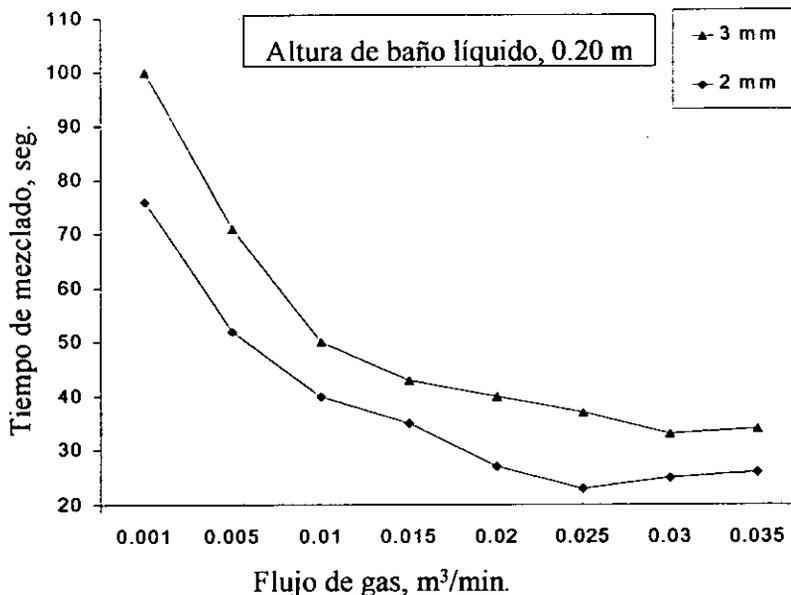


Figura 5.3: Efecto de la variación de flujo de aire insuflado y diámetro de tobera, sobre el tiempo de mezclado.

Aplicando los principios de balance de población en este trabajo de tesis se revela que el proceso de mezclado presenta desviaciones muy grandes del comportamiento ideal de mezcla completa, originadas por la formación de espacios muertos y cortocircuito en el flujo [11].

Las figuras 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 caracterizan cualitativamente esta no idealidad en el volumen del reactor.

Estas desviaciones, se relacionan con el comportamiento que se observa en las boquillas, al hacer pasar un flujo de aire.

A flujos elevados la corriente de burbujas que ascienden en el baño producen elementos de fluido en los que ocurren remolinos o "eddies". Cuando estos elementos pasan por el reactor con una velocidad considerablemente mayor que otros se produce el fenómeno "cortocircuito".

A flujos menores se observa la formación de burbujas discretas, estas no producen remolinos (flujo no turbulento), pero sí zonas muertas en el cuerpo líquido que retardan el tiempo de mezclado.

El efecto de cortocircuito en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 es representado por curvas de pendiente convexa. Las curvas de pendiente cóncava de las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 representan el efecto de espacios muertos en el volumen del reactor.

Para las condiciones de trabajo de las figuras 5.4 y 5.6 los efectos de corto circuito se observan, en los flujos 25, 30 y $35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$. Para evitar que las curvas se encimen solo se grafican los flujos extremos, en este caso, 25 y $35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$.

En la figura 5.5 se grafican solo los flujos 20 y $35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ para ejemplificar los mismos efectos. La coalescencia contribuye a que el efecto de cortocircuito predomine cuando las velocidades de flujo son muy altas.

La coalescencia se origina en un punto del cuerpo del líquido en alguna distancia por arriba de la tobera, pero conforme se incrementa el flujo de gas, el punto de coalescencia desciende establemente hacia el orificio hasta que la dispersión llega a un chorro continuo, esto produce remolinos que al pasar por el reactor con una velocidad considerablemente mayor que otros, provoca el cortocircuito. Sin embargo, en la figura 5.11 no se observan efectos de corto circuito.

Cuando se trabaja con baños líquidos de mayor altura se logra mover el punto de

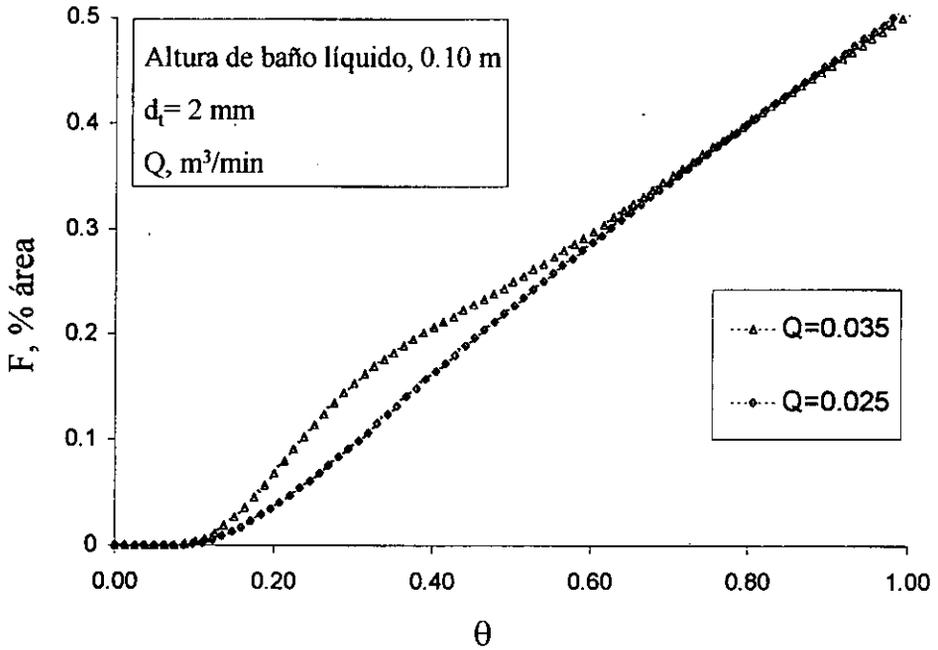


Figura 5.4: Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por efectos de cortocircuito. Altura de baño líquido 0.10 m, diámetro del orificio en la tobera 2 mm.

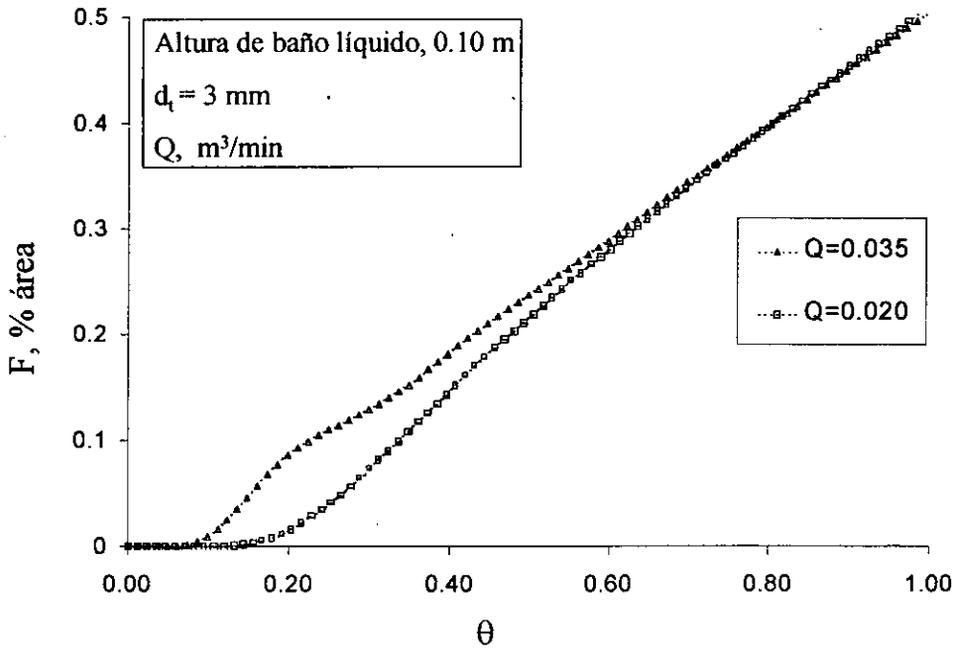


Figura 5.5: Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por efectos de cortocircuito. Altura de baño líquido 0.10 m, diámetro del orificio en la tobera 3 mm.

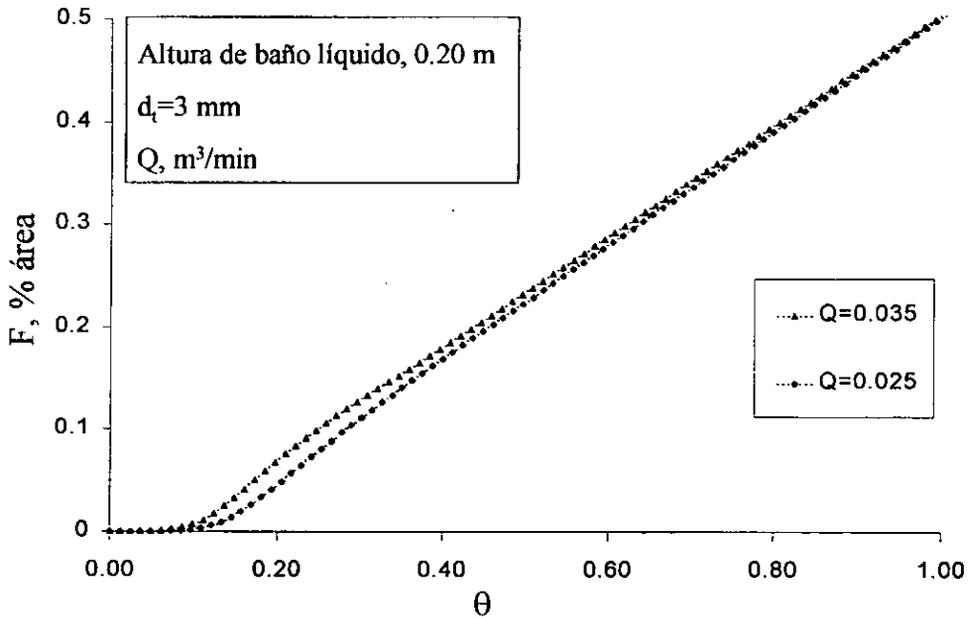


Figura 5.6: Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por efectos de cortocircuito. Altura de baño líquido 0.20 m, diámetro del orificio en la tobera 3 mm.

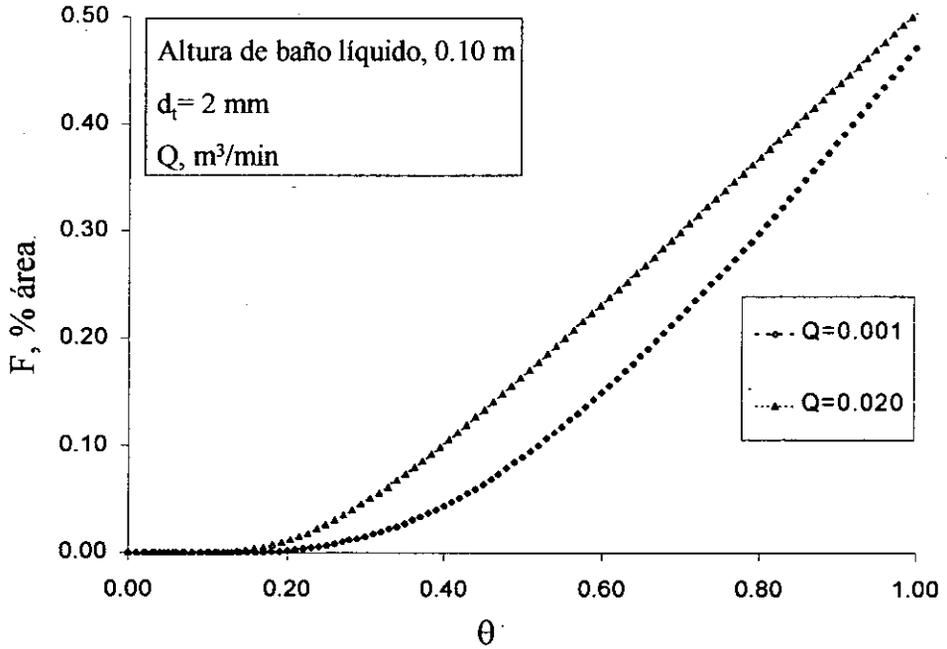


Figura 5.7: Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por la formación de espacios muertos. Altura de baño líquido 0.10 m, diámetro del orificio en la tobera 2 mm

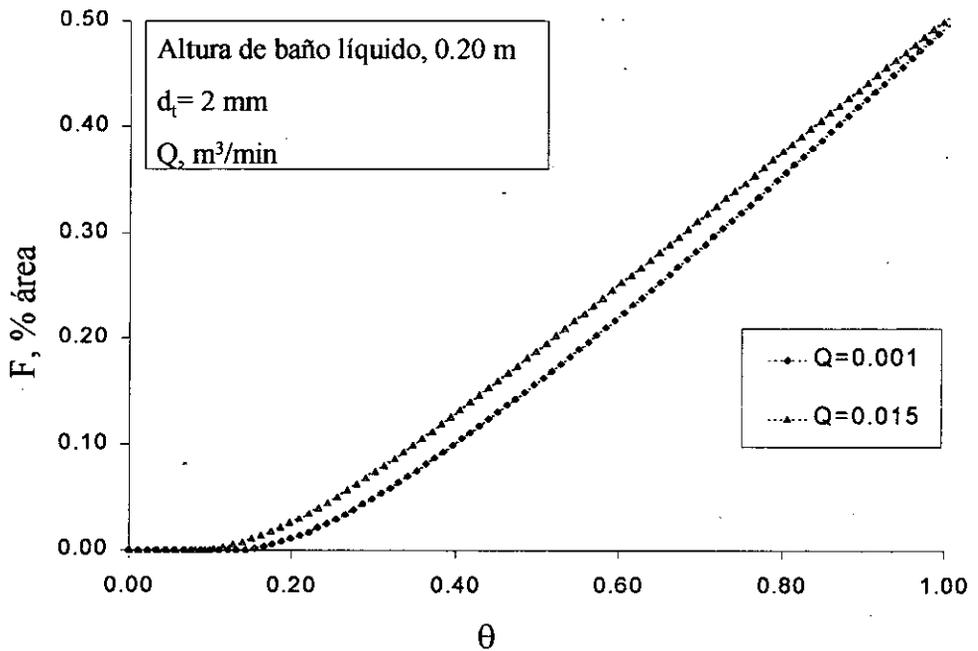


Figura 5.8: Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por la formación de espacios muertos. Altura de baño líquido 0.20 m, diámetro del orificio en la tobera 2 mm

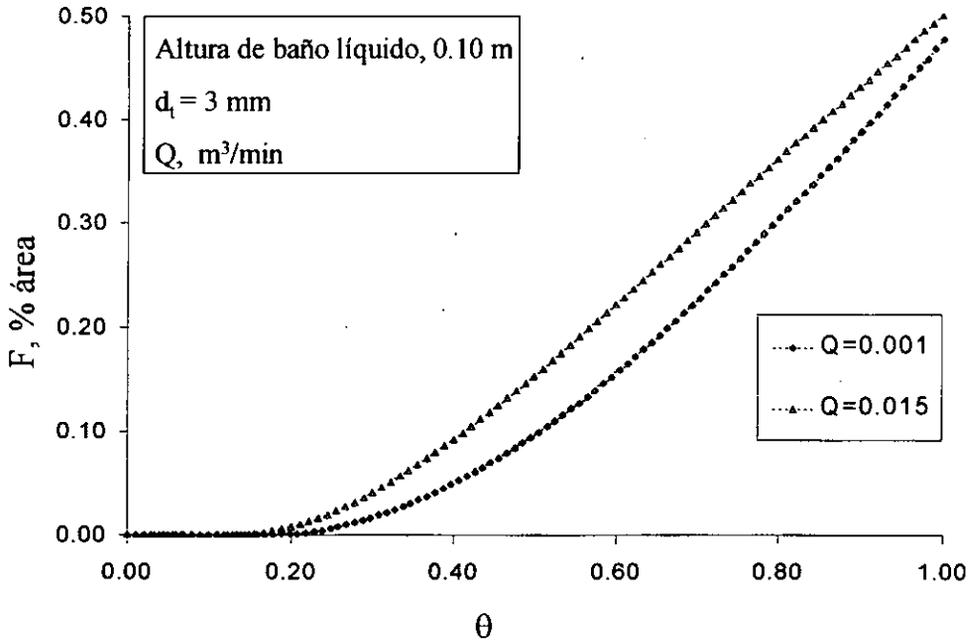


Figura 5.9: Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por la formación de espacios muertos. Altura de baño líquido 0.10 m, diámetro del orificio en la tobera 3 mm.

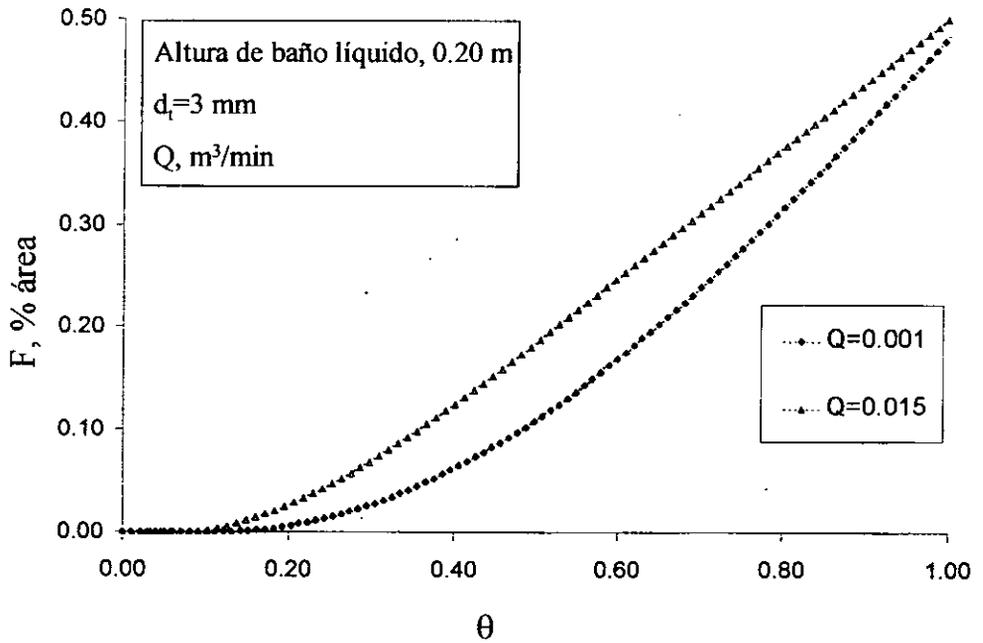


Figura 5.10: Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por la formación de espacios muertos. Altura de baño líquido 0.20 m, diámetro del orificio en la tobera 3 mm.

coalescencia, evitándose así un chorro continuo.

Para las condiciones de trabajo de las figuras 5.9, 5.10 y 5.8 los flujos 1, 5, 10 y 15 $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ presentan espacios muertos; para evitar que las curvas se encimen solo se graficaran los casos extremos. En la figura 5.7 para ejemplificar la formación de espacios muertos, solo se presentan los flujos 1 y 20 $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$. La presencia de espacios muertos en el reactor predomina cuando las velocidades de flujo son bajas.

Una manera de resumir los efectos de cortocircuito y espacios muertos y relacionarlos con el comportamiento observado en las figuras 5.2 y 5.3 es a través de las figuras 5.12 y 5.13.

Como se mencionó anteriormente, las curvas con pendiente convexa en las figuras 5.12 y 5.13 indican que el fluido está afectado por comportamiento de cortocircuito, mientras que las curvas con pendientes cóncavas indican la existencia de espacios muertos en el reactor.

En la figura 5.12 se grafica, para los dos diámetros de tobera utilizados en este trabajo, la curva para un flujo de $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ con el fin de ejemplificar la desviación del flujo ideal originada por la presencia de espacios muertos en un baño líquido de 0.10 m de altura. Se puede observar que la desviación que presenta la curva, en ambos diámetros de tobera, es de la misma magnitud. Sin embargo, la curva que le corresponde a la tobera de 3 mm de diámetro está por debajo de la curva de la tobera de 2 mm de diámetro. Esta ligera diferencia hace que el tiempo de mezclado, para una tobera de 3 mm de diámetro, sea más largo que para una tobera de 2 mm de diámetro, a bajos flujos de gas insuflado.

Para flujos mayores, por ejemplo $35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ de la figura 5.12, las desvia-

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

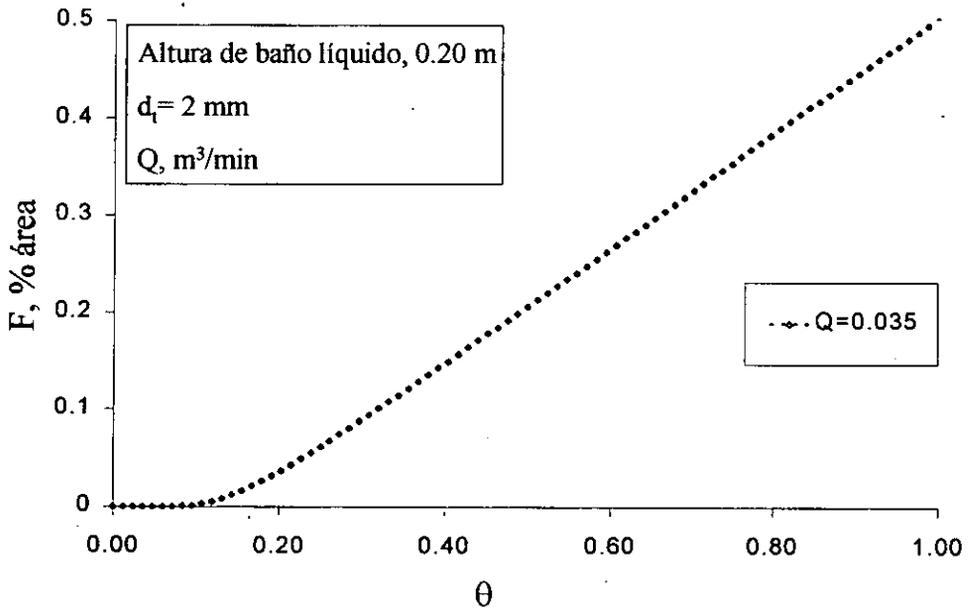


Figura 5.11: Curva F para una altura de baño líquido 0.20 m y diámetro del orificio en la tobera de 3 mm. No se observa desviación de la idealidad en el fluido por efectos de cortocircuito.

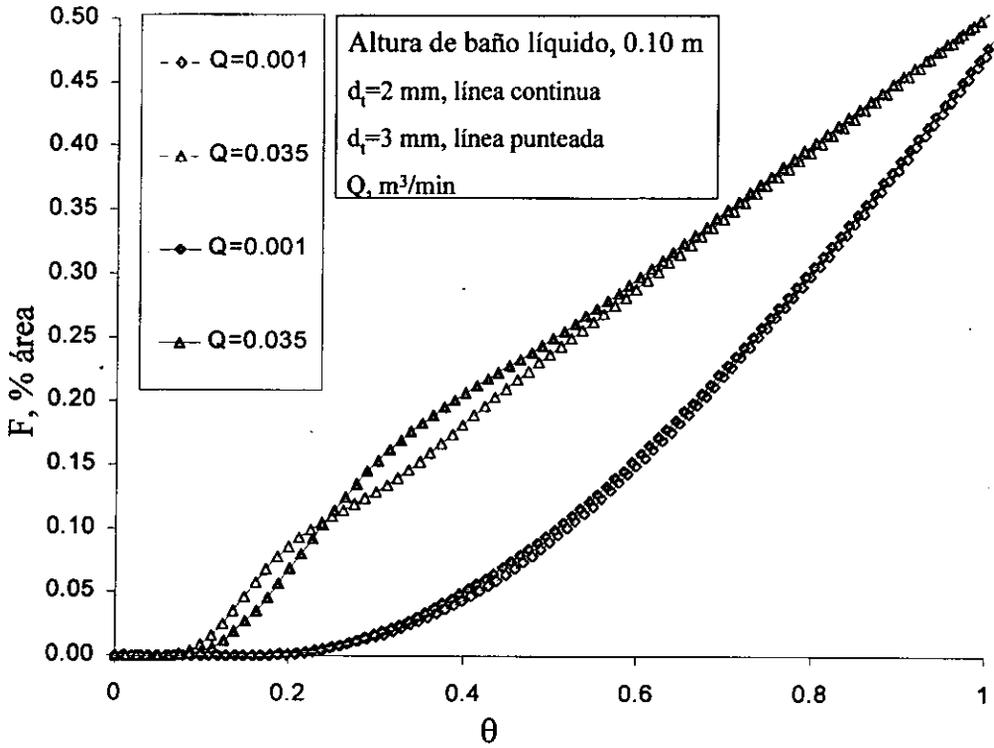


Figura 5.12: Características de mezclado para un baño líquido de 0.10 m de altura, al variar el flujo de gas insuflado (Q) y el diámetro de tobera (d_t).

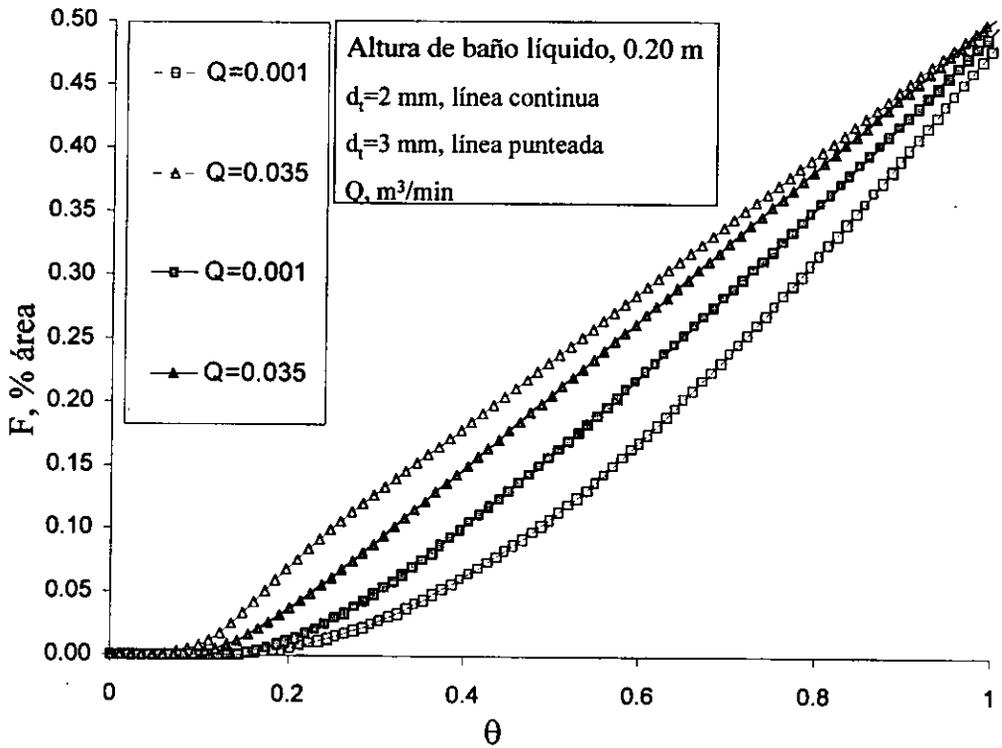


Figura 5.13: Características de mezclado para un baño líquido de 0.20 m de altura, al variar el flujo de gas insuflado (Q) y el diámetro de tobera (d_t)

ciones del flujo ideal serán originadas por efecto de cortocircuito. Comparando los flujos de ambas toberas se observa que las curvas para una tobera de 2 mm de diámetro presentan una desviación mas significativa en comparación con las curvas de una tobera de 3 mm. En este caso, la curva que le corresponde a la tobera de 3 mm estará por debajo de las curvas de la tobera de 2 mm. Lo anterior explica por que en la figura 5.2 para un diámetro de tobera de 2 mm, después de los $20 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$, el parámetro τ_{mez} aumenta por arriba de los valores que presentan las curvas de la tobera de 3 mm de diámetro.

En particular el fenómeno cortocircuito, bajo las condiciones de la figura 5.12, se presentara a flujos mayores a $20 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$.

Las condiciones de trabajo en la figura 5.13 muestran que la formación de espacios muertos en la curva correspondiente a $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ se reducen; los flujos con tobera de 3 mm de diámetro presentan la desviación más significativa.

Las figuras 5.12 y 5.13 revelan cualitativamente que a bajos flujos de gas insuflado y con alturas de baño liquido pequeñas se promueve la formación de espacios muertos. Este efecto disminuye si se utiliza toberas con orificios de diámetro pequeño.

Esto explica por que en las figuras 5.2 y 5.3 a flujos menores a $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ los tiempos de mezclado son tan largos.

Capítulo 6

Conclusiones

Los tiempos de mezclado más eficientes se obtuvieron para la tobera de 2 *mm* de diámetro y una altura de baño líquido de 0.20 m.

El fenómeno de espacios muertos en el baño líquido disminuye con toberas de 2 *mm* de diámetro, sin embargo, a bajos flujos de gas estos espacios aumentan.

El fenómeno de corto circuito disminuye significativamente al aumentar la altura de baño.

La existencia de fenómenos de cortocircuito y espacios muertos en un reactor agitado por el fondo indica una deficiencia en la operación, debido a que se incrementa el tiempo de mezclado.

La aplicación de los principios de balance de población en las características del flujo y mezcla en reactores agitados por el fondo, es una herramienta útil para caracterizar un proceso de mezclado.

Bibliografía

- 1 Frank A. Vonesh y Nicolas G. Perrin, "*Post-combustion for the electric arc furnace*", *Iron and Steel Engineer*, June 1995, pp. 30-32
- 2 N. A. Downie, "*Industrial Gases*", Ed. Blackie Academic & Professional 1997, Capítulo 3.
- 3 M. Iguchi, R. Tsujino, K. Nakamura y M. Sano, "*Effects of surface flow control on fluid flow phenomena and mixing time in a bottom blow bath*", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 30B, August 1999, pp. 631-637
- 4 G. Gkrishna Murthy, S.P. Mehrotra and A. Ghosh, "*Experimental investigation of mixing phenomena in a gas stirred liquid bath*", *Metallurgical Transactions B*, 1988, vol. 19B, pp. 839-850.
- 5 Jürgen Mietz y Franz Oeters, "*Model Experiments on Mixing Phenomena In Gas-Stirred Melts*", *Steel Research*, 1988, vol. 59, pp. 52-59.
- 6 K. Krishnakumar, N.B. Ballal, P.K. Sinha, "*Water Model Experiments on Mixing Phenomena in a VOD Ladle*", *ISIJ International*, 1999, vol. 39, 419-425.
- 7 K. Nakanishi, T. Fuji y J. Szekeley, "*Possible relationship between energy dissipation and agitation in steel processing operations*", *Ironmaking and Steelmaking*(Quarterly), 1975, No. 3, pp 193-197.
- 8 Jerzy Badyga y John R. Bourne, "*Turbulent Mixing and Chemical Reactions*", Ed. John Wiley & Sons, New York; 1999.
- 9 D. M.Himmelblau & K. B. Bischoff, "*Análisis y Simulación de procesos*", Ed. Reverte 1992, Capítulo 4, pp127-194.
- 10 R. I. L. Guthrie, "*Engeneering in Process Metallurgy*", Ed. Clarendon Press-Oxford, 1992, Capítulo 3, pp 151-211.
- 11 Octave Levenspiel, "*Ingeniería de las Reacciones Químicas*", Ed. REPLA,1987, Capítulo 9, pp. 277-347.
- 12 U.P. Sinha and M. J. McNallan, "*Mixing in ladles by Vertical Injection og Gas and Gas-Particle Jets - A Water Model Study*", *Metallurgical Transactions B*, 1985, vol. 16B, pp. 850-853
- 13 N. Harnby, M. F. Edwards y A. W. Nienow, "*Mixing in the process industries*", 1992, Capítulo 9.
- 14 Dipak Mazumdar y Roderick I.L. Guthrie, "*Mixing Models For Gas Stirred Metallurgical Reactors*". *Metallurgical Transactions B*, 1986, vol, 17B, pp. 725-733.
- 15 J. Antonio Barrera G., "*Sugerencias para escritura de tesis*", Cd. Universitaria, noviembre de 1998.

Índice de Figuras

2.1	Tanque de flujo continuo que exhibe (a) flujo piston, (b) mezcla perfecta, (c) características intermedias	5
2.2	Inyección del trazador en un tanque agitado	7
2.3	Curva concentración-tiempo típica en los experimentos estímulo-respuesta	8
4.1	Equipo experimental	12
4.2	Posición de las toberas en el fondo del reactor (Vista superior).	13
4.3	Arreglo utilizado para la calibración de flujómetros	15
5.1	Muestra el calculo de τ_{mez} , considerado como el momento en el cual la concentración del trazador al tiempo i , C_i , se ha aproximado a la concentración promedio esperada del trazador, C	18
5.2	Efecto de la variación de flujo de aire insuflado y diámetro de tobera, sobre el tiempo de mezclado.	19
5.3	Efecto de la variación de flujo de aire insuflado y diámetro de tobera, sobre el tiempo de mezclado.	20

- 5.4 Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por efectos de cortocircuito. Altura de baño líquido 0.10 m, diámetro del orificio en la tobera 2 mm. 22
- 5.5 Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por efectos de cortocircuito. Altura de baño líquido 0.10 m, diámetro del orificio en la tobera 3 mm. 23
- 5.6 Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por efectos de cortocircuito. Altura de baño líquido 0.20 m, diámetro del orificio en la tobera 3 mm. 24
- 5.7 Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por la formación de espacios muertos. Altura de baño líquido 0.10 m, diámetro del orificio en la tobera 2 mm 25
- 5.8 Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por la formación de espacios muertos. Altura de baño líquido 0.20 m, diámetro del orificio en la tobera 2 mm 26
- 5.9 Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por la formación de espacios muertos. Altura de baño líquido 0.10 m, diámetro del orificio en la tobera 3 mm. 27
- 5.10 Curva F, representación cualitativa de la desviación de la idealidad en el fluido, originada por la formación de espacios muertos. Altura de baño líquido 0.20 m, diámetro del orificio en la tobera 3 mm. 28

- 5.11 Curva F para una altura de baño líquido 0.20 m y diámetro del orificio en la tobera de 3 mm. No se observa desviación de la idealidad en el fluido por efectos de cortocircuito. 30
- 5.12 Características de mezclado para un baño líquido de 0.10 m de altura, al variar el flujo de gas insuflado (Q) y el diámetro de tobera(d_t). . . 31
- 5.13 Características de mezclado para un baño líquido de 0.20 m de altura, al variar el flujo de gas insuflado (Q) y el diámetro de tobera(d_t) . . . 32