



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

MODELADO FÍSICO DE FLUJO DE FLUIDOS EN UN  
DISTRIBUIDOR DE COLADA CONTINUA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

LUIS SANCHEZ GUTIERREZ



MÉXICO D.F

2009



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. Leopoldo Rodríguez Reyes
Vocal	Prof. José Antonio Barrera Godínez
Secretario	Prof. José Bernardo Hernández Morales
1er. Suplente	Prof. Alberto Ingalls Cruz
2do. Suplente	Prof. Oscar Jesús Rendón Gómez

Sitio donde se desarrollo el tema:

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALURGICA  
LABORATORIO 005, EDIFICIO "D"  
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

Asesor del tema:

---

Dr. José Bernardo Hernández Morales

Sustentante:

---

Luis Sánchez Gutiérrez

# **Agradecimientos**

**Agradezco sinceramente:**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de formarme profesionalmente y así poder ser útil.**

**Especialmente a mi asesor el Dr. J. Bernardo Hernández M. por su dedicación, apoyo y comprensión.**

**Al Profr. Ignacio Beltrán Piña por su asesoría en la construcción del sistema de experimentación.**

**Al M. en C. Héctor J. Vergara Hernández por su apoyo en el manejo de datos.**

**A todos y cada uno de los profesores que dentro y fuera de la Universidad contribuyeron a mi formación.**

**Dedicado a:**

**Mis padres Apolinar y Francisca:**

**Llegar a tener la posibilidad de desenvolverme profesionalmente es hasta ahora el logro más significativo de mi vida y éste trabajo de Tesis lo representa. En él también se resumen, de alguna manera, los esfuerzos y privaciones que ustedes hicieron para conseguirlo. Desde luego se los dedico con profundo respeto y cariño porque éste es también su logro. Que Dios los bendiga.**

**Mis hermanos Angelina, Custodia, Clemente, Maria, Rogelio y Salvador:**

**Muchos fueron los estímulos que de ustedes recibí para lograr éste título... a veces un simple pero muy significativo ¿cómo vas? y todo me nutrió para seguir. A pesar del tiempo y las caídas no pierdo las ganas de aplicarme para mejorar y confío en que pronto habrá alguna buena oportunidad para compartir momentos mejores.**

**Un abrazo bien fuerte y afectuoso para cada uno de ustedes y Gracias por todo su apoyo y por depositar en mí la confianza para lograrlo.**

# Contenido

Contenido.....	i
Capítulo 1 Introducción.....	1
Capítulo 2 Antecedentes.....	3
2.1. Colada Continua.....	3
2.2. Modelos físicos.....	5
2.3. Criterios de similitud.....	6
2.4. Modelos de balance de población en sistemas de flujo continuo.....	8
2.4.1. Tipos de flujo en sistemas de flujo continuo (flujo ideal).....	9
2.4.2. Funciones de distribución de edad.....	10
2.4.3. Relación entre las funciones de distribución de edad .....	12
2.4.4. Determinación experimental de las funciones de distribución de edad.....	13
2.4.5. Interpretación de las funciones de distribución de edad.....	15
2.4.6. Modelo combinado para el flujo no ideal en un distribuidor de colada continua.....	17
Capítulo 3 Objetivo y alcance.....	21
Capítulo 4 Desarrollo experimental.....	23
4.1. Equipo experimental.....	23
4.2. Condiciones experimentales.....	25
4.3. Procedimiento experimental.....	26
4.4. Manejo de datos .....	27
Capítulo 5 Resultados.....	29
5.1. Reproducibilidad y manejo de datos.....	29
5.2. Experimentos sin cortinas de aire (curvas pH vs. tiempo).....	32
5.2.1. Efecto del nivel de agua.....	32

5.2.2. Efecto del flujo de agua en la entrada.....	33
5.3. Experimentos con cortinas de aire (curvas pH vs. tiempo).....	35
5.3.1. Efecto de la presencia de cortina de aire.....	35
5.3.2. Efecto del nivel de agua.....	36
5.4. Experimentos sin cortinas de aire (patrones de flujo).....	39
5.4.1. Efecto del nivel de agua.....	39
5.4.2. Efecto del flujo de agua en la entrada (patrones de flujo).....	42
5.5. Experimentos con cortinas de aire (patrones de flujo).....	43
5.5.1. Efecto de la presencia de la cortina de aire.....	43
5.5.2. Efecto del nivel de agua.....	44
Capítulo 6 Análisis de Resultados.....	50
6.1. Experimentos sin cortinas de aire (calidad de flujo).....	50
6.1.1. Efecto del nivel de agua.....	50
6.1.2. Efecto del flujo de agua en la entrada.....	58
6.2. Experimentos con cortinas de aire (calidad de flujo).....	66
6.2.1. Efecto de la presencia de la cortina de aire.....	66
6.2.2. Efecto del nivel de agua .....	71
Capítulo 7. Conclusiones.....	81
Índice de figuras.....	85
Índice de tablas.....	90
Bibliografía.....	91

## Capítulo 1. Introducción

En el proceso de colada continua el distribuidor se ha convertido en tema de numerosos estudios encaminados a mejorar la calidad final de los aceros. Un distribuidor que opera en condiciones óptimas debe garantizar en principio las condiciones necesarias para alimentar al molde con un flujo continuo de metal líquido libre de turbulencia durante los cambios de olla y facilitar una última etapa de remoción de impurezas. El patrón de flujo, la flotación y separación de inclusiones son, entonces, fenómenos que se deben controlar en ésta etapa del proceso lo cual se logra modificando las dimensiones del distribuidor y/o haciendo uso de inhibidores de turbulencia y modificadores de flujo como pueden ser presas, represas, inyección de gas, etc. Para evaluar la efectividad del diseño de un distribuidor los investigadores han simulado el comportamiento del fluido tanto física como matemáticamente antes de implementarlo a nivel industrial. El modelado matemático impone algunas limitaciones puesto que sólo es realizado por personal especializado y requiere de más recursos económicos, en cambio el modelado físico resulta ser menos costoso y relativamente más fácil de realizar por personal inexperto

En este trabajo se estudió el efecto que tiene la presencia de cortinas de burbujas de aire colocadas cerca de los hilos de salida del distribuidor sobre los patrones y calidad de flujo. También se estudiaron los patrones y calidad de flujo presentes en ausencia de las cortinas de aire. Ambos resultados se compararon con el propósito de identificar alternativas de operación y con ello plantear una nueva ruta de investigación.. Para ello se utilizaron un distribuidor de acrílico construido a escala, agua como sustituto del acero líquido, y aire a presión que se hace pasar a través de una pieza de arena shell que genera la cortina de burbujas. Además se usaron técnicas estímulo-respuesta y de visualización, para las que se usaron ácido sulfúrico y colorante 40 como trazadores, que permiten conocer

aspectos cualitativos de los patrones de flujo. Los datos obtenidos fueron tratados con los modelos de balance de población y el modelo combinado y curvas RTD de Sahai y Emi, los cuales permiten conocer los aspectos cuantitativos y el grado de desviación que tiene el fluido respecto al flujo ideal.

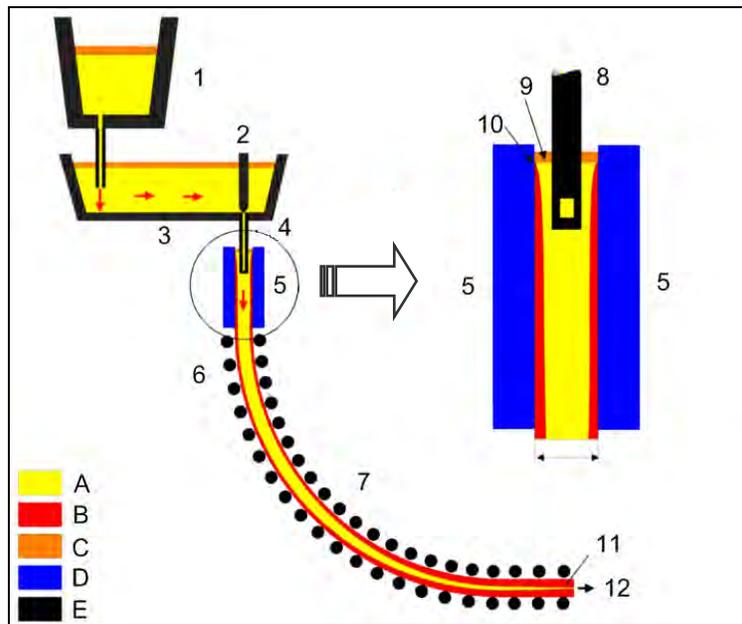
En este trabajo se encontró que aunque las cortinas de aire favorecen el desplazamiento del fluido hacia la superficie, también generan corrientes que retardan la salida del trazador por efecto de la agitación provocando que aumente el tiempo de residencia del trazador en el distribuidor lo que a su vez da lugar a la aparición de volumen muerto, particularmente para niveles de agua altos. Las mejores características y patrones de flujo se obtuvieron en los casos en que no se usaron cortinas de aire como inhibidores de flujo. Se observó que operar con niveles de agua en distribuidor intermedios, con o sin cortinas de aire, es recomendable pues en ninguno de los casos se registra la presencia de volumen muerto; a niveles bajos de agua en distribuidor se detectó la formación de vórtices que eventualmente arrastrarán la escoria hacia los moldes y a niveles altos es más probable tener volúmenes muertos que provocan la pérdida de temperatura del metal líquido en un proceso real de colada continua.

## Capítulo 2. Antecedentes

### 2.1. Colada Continua

La colada continua es un proceso industrial a través del cual el metal líquido se solidifica para obtener diferentes piezas metálicas semi-terminadas como son planchones (*slabs*) y palanquillas (*billets*). Antes de los años cincuenta, época en que se introdujo éste proceso de producción, el acero líquido se vertía en moldes para obtener lingotes que, en la mayoría de los casos, resultaban tener serios defectos internos. Sin embargo el proceso de colada continua ganó terreno y se desarrolló de tal manera que mostró mejoras sustanciales en la calidad, productividad y costos en las piezas metálicas obtenidas, siendo ahora el único proceso para la fabricación de partes semi-terminadas de acero y de otras aleaciones.

Aunque existen diferentes configuraciones posibles en el proceso de colada continua las principales etapas consisten en (ver Figura 2.1) transportar el metal líquido refinado en una olla de transferencia desde un horno eléctrico o un convertidor BOF (Basic Oxygen Furnace) a una olla de alimentación (1); después de llenarse y aislarse térmicamente en la parte superior, la olla alimenta de metal líquido al distribuidor que se encuentra debajo (3). En el distribuidor el metal se descarga (4 y 8) a velocidad controlada por un dispositivo regulador de flujo (2) hacia moldes de cobre enfriados con agua en donde empieza la solidificación (5). Cuando ha solidificado lo suficiente el metal (9 y 10) entra a una serie de rodillos de soporte (6 y 7) que lo guían hacia una segunda zona de enfriamiento (6) en donde un conjunto de espreas le lanzan agua y aire mientras avanza por efecto del tren de rodillos y va siendo conformado según los requerimientos. Al final de la trayectoria y una vez que todo el metal líquido ha solidificado, la pieza es cortada (11) y almacenada para tratamientos posteriores (12).



**Figura 2.1.- El proceso de colada continua [1].**

El distribuidor (3, Figura 2.1) es un reactor muy importante dentro del proceso de colada continua pues en él se lleva al cabo la remoción de inclusiones como última etapa de refinación del metal; además, proporciona un flujo de metal líquido continuo al molde mientras se dan los cambios de olla, alimenta a los moldes con patrones de flujo estables y también funciona como depósito de metal líquido estable antes de pasar a los moldes, contribuyendo a que la velocidad de avance en la solidificación se mantenga constante e ininterrumpida.

Con respecto a la remoción de inclusiones, Sahai y Emi [2] sugieren que para reducir las inclusiones de manera efectiva dentro de un distribuidor que opera en estado estable es necesario poner atención en los siguientes aspectos:

- 1) Que las dimensiones del distribuidor sean tales que faciliten la flotación de partículas de acuerdo a la Ley de Stoke.
- 2) Que el flujo del fluido sea boyante desde el momento que entra y hasta por lo menos la mitad de la longitud del distribuidor de modo que se facilite el contacto metal líquido-escoria..

- 3) Que la turbulencia del fluido sea mínima en la intercara escoria-metal líquido.
- 4) Que no existan cortocircuitos a lo largo de la trayectoria del metal líquido desde la entrada y hasta la salida.
- 5) Que el volumen muerto dentro del distribuidor sea el mínimo posible.
- 6) Que el tiempo de residencia sea el suficiente para promover la flotación.
- 7) Que exista aislamiento térmico y protección del metal líquido contra la oxidación lo que se puede lograr mediante la inyección de gas argón y/o una capa de fundente.

La implementación de tales condiciones depende en la mayoría de los casos de las circunstancias locales, pues para cada instalación industrial se han desarrollado esquemas operacionales preventivos propios. Sin embargo, uno de los aspectos que se ha comprobado que es efectivo en lo que se refiere a la remoción de inclusiones es el de las dimensiones y perfil del distribuidor [3].

## **2.2 Modelos físicos**

En el estudio de los procesos metalúrgicos el uso de modelos físicos es una herramienta de gran utilidad porque permite conocer de manera aproximada las relaciones existentes entre las diferentes variables de un sistema cuando es imposible conocerlas a partir de observaciones directas en sistemas industriales reales. En la construcción de modelos físicos para el estudio de un proceso industrial se busca tener una representación a escala del sistema real pero con materiales diferentes que faciliten la determinación de los fenómenos físicos existentes. Desde luego, es importante que tal representación se acerque lo más posible a la realidad.

En función del objetivo buscado, los modelos físicos se pueden construir: 1) siguiendo reglas estrictas como los criterios de similitud geométrica, dinámica, cinemática, etc.; 2) estudiando únicamente los fenómenos físicos más relevantes en donde el objetivo principal es obtener información útil para la construcción de un modelo matemático; y 3) con el objetivo de realizar experimentos *ad hoc* que permitan conocer aspectos fundamentales en el comportamiento del sistema como requisito preliminar hacia otros estudios de modelado físico más rigurosos o que involucren el modelado matemático [4]. En la mayoría de los casos las dos primeras opciones exigen una inversión de tiempo y recursos considerables, mientras que la tercera opción -estudios *ad hoc*- es menos rigurosa y de gran utilidad cuando no se está familiarizado con los fenómenos físicos que gobiernan el sistema.

### **2.3. Criterios de similitud**

Los principales requisitos que un modelo físico debe cumplir para representar a un sistema real o prototipo son los criterios de similitud. Algunos de los más comunes son: los criterios de similitud geométrica, cinemática, dinámica, térmica y química.

Sin embargo, en muchos de los experimentos realizados para simular el comportamiento del fluido en un distribuidor de colada continua ha sido suficiente cumplir con el criterio de similitud dinámica, la cual ocurre entre dos sistemas cuando la magnitud de las fuerzas en cada ubicación de un sistema corresponde a la magnitud de fuerzas en el otro sistema en una proporción fija.

El comportamiento del fluido en el distribuidor está gobernado principalmente por las fuerzas inerciales que causan el momentum del chorro incidente, las fuerzas viscosas y por las fuerzas gravitacionales. Entonces los números adimensionales de Reynolds y

Froude son importantes pues relacionan tales fuerzas y nos permiten verificar el criterio de similitud dinámica

Por una parte, el número de Reynolds expresa la relación que existe entre las fuerzas inerciales y viscosas que actúan en un fluido y la ecuación que lo representa es:

$$\text{Re} = \frac{VL\rho}{\mu} \quad (2.1)$$

. Las fuerzas inerciales ( $VL\rho$ ) dan origen al flujo convectivo (o transferencia de momentum convectivo) y las fuerzas viscosas ( $\mu$ ) causan la transferencia de momentum difusivo o viscoso. En el flujo laminar la viscosidad molecular del fluido provoca el intercambio entre capas adyacentes dando lugar a la transferencia de momentum por difusión.

Sin embargo en la mayoría de los casos el flujo en un distribuidor es turbulento pues la transferencia de momentum por difusión no ocurre solamente por el intercambio de moléculas sino también por el intercambio de corrientes o torbellinos. En un flujo turbulento la transferencia de momentum por difusión depende de la viscosidad efectiva (que es la suma de las viscosidades molecular y turbulenta) y no únicamente de la viscosidad molecular.

Por lo anterior el número de Reynolds es muy importante cuando se trata de flujos laminares pero es insignificante para flujos turbulentos; como consecuencia un modelo a escala no satisface el número adimensional de Reynolds como criterio de similitud [5] –lo cual es posible únicamente cuando se usa un modelo a escala 1:1 y se mantiene la misma velocidad de fluido en el modelo y en el prototipo.

Por otra parte, el número de Froude expresa la relación existente entre las fuerzas inerciales ( $V^2$ ) y las fuerzas gravitacionales ( $gL$ ) y la ecuación que lo representa es:

$$Fr = \frac{V^2}{gL} \quad (2.2)$$

La similitud entre un modelo y un prototipo implica que el número de Froude sea

$$\left(\frac{V^2}{gL}\right)_m = \left(\frac{V^2}{gL}\right)_p \quad (2.3)$$

donde “*m*” se refiere al modelo y “*p*” al prototipo. Dado que la gravedad es la misma para ambos sistemas la ecuación anterior se puede escribir

$$V_m = \lambda^{1/2} V_p \quad (2.4)$$

donde *V* es la velocidad del fluido y  $\lambda$  es el factor de escalamiento que está dado en términos de las longitudes (*L*) por:

$$\lambda = \frac{L_m}{L_p} \quad (2.5)$$

En términos de flujos volumétricos [5] la ecuación (2.4) queda:

$$Q_m = \lambda^{5/2} Q_p \quad (2.6)$$

Generalmente los investigadores han considerado que el número de Froude es suficiente como criterio de similitud a cumplir en el modelado físico [6].

#### **2.4. Modelos de balance de población en sistemas de flujo continuo.**

Dentro de los modelos matemáticos que han sido desarrollados para describir cuantitativamente el comportamiento de sistemas de flujo continuo se encuentran los modelos de balance de población [7]. Danckwerts, por su parte, [8] definió ciertas funciones de distribución para los elementos de fluido en un tanque de proceso basándose en un balance macroscópico. Aunque estas funciones dan información sobre la fracción de

fluido que permanece un cierto tiempo en un tanque no dan información detallada sobre la variación de un punto a otro de las variables dependientes tales como la velocidad, coeficientes de difusión, etc. Sin embargo, los modelos de balance de población son con frecuencia útiles para estimar el comportamiento de un proceso y son el resultado de la búsqueda de mejores métodos que ayuden en la optimización del diseño y la operación de los reactores.

#### **2.4.1 Tipos de flujo en sistemas de flujo continuo.**

Una aplicación importante de los balances de población es la determinación de la desviación con respecto al flujo ideal que se observa en un reactor industrial. Por flujo ideal se entiende una condición límite – no existente usualmente en un reactor industrial. El volumen o flujo pistón es un caso límite de tipo de flujo presente en un reactor; ocurre cuando la velocidad del fluido es uniforme en toda la sección transversal del reactor (no hay mezcla longitudinal). En este tipo de flujo cada elemento de fluido que entra en el reactor pasa a través de él sin mezclarse con otros elementos de fluido que entran antes o después. El extremo opuesto al flujo pistón corresponde a la condición de flujo con mezcla perfecta, que supone que el contenido del reactor es completamente homogéneo a escala molecular en cualquier tiempo durante el proceso. Los procesos reales se encuentran entre estos dos conceptos extremos de flujos y el tiempo de residencia de un elemento de fluido es un concepto involucrado en la determinación de tales tipos de fluido. El tiempo de residencia de un elemento de fluido se define como el tiempo que transcurre desde el instante en que el elemento entra en el recipiente hasta que lo abandona, mientras que el tiempo medio de residencia es, estadísticamente, el cálculo de la media o promedio de todos los elementos de fluido que pasan por el recipiente. Por otra parte, la fracción de

volumen muerto o estancado se define como el fluido que se mueve lentamente dentro del reactor y permanece en él por tiempos mayores de hasta dos veces el tiempo medio de residencia.

El volumen en cortocircuito o formación de canales ocurre cuando algunos elementos de fluido pasan a través del tanque de proceso mucho más rápidamente que otros lo que resulta en una disminución del volumen útil del equipo. La existencia de este tipo de fenómeno es un indicio de que el diseño del modelo físico es defectuoso.

#### **2.4.2 Funciones de distribución de edad.**

Las definiciones cuantitativas propuestas por Danckwerts involucran la edad de un elemento que, para un determinado instante, es el tiempo transcurrido entre la entrada del elemento en el recipiente y un instante cualquiera considerado. Este puede ser menor, igual o mayor al tiempo medio de residencia.

Para conocer el tiempo medio de residencia  $\bar{t}$  se necesita determinar primero la función  $E(t)$ , que se define como la frecuencia de la distribución de edad de los elementos de fluido que abandonan el recipiente a un cierto tiempo  $t$ , y tiene las dimensiones de fracción de edades por unidad de tiempo. La función normalizada es:

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad (2.7)$$

donde  $E(t)$  está a su vez definida por:

$$E(t) = \frac{c(t)}{c_0} \quad (2.8)$$

y  $c(t)$  es el valor de concentración registrado experimentalmente en función del tiempo;  $c_0$  es el área bajo la curva experimental:

$$c_0 = \int_0^{\infty} c(t)dt \quad (2.9)$$

A partir de las expresiones anteriores se puede calcular el tiempo medio de residencia,  $\bar{t}$ , mediante la ecuación:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} tE(t)dt \quad (2.10)$$

La función  $I(t)$  representa a la frecuencia interna de distribución de edad de los elementos de fluido contenidos en el reactor. Tiene dimensiones de fracción de edades por unidad de tiempo. De acuerdo con la teoría de probabilidades, la fracción de elementos comprendidos entre las edades  $t$  y  $t + \Delta t$  está dada por  $I(t)\Delta t$ . Dado que  $I(t)$  es una función continua se normaliza tomando la suma de todas las fracciones como igual a la unidad, esto es:

$$\int_0^{\infty} I(t)dt = 1 \quad (2.11)$$

El tiempo  $t = 0$  se refiere a un tiempo inicial arbitrario y no al comienzo del flujo del fluido hacia el interior del tanque. Físicamente, ésta ecuación establece que todo fluido tiene en alguna parte una edad comprendida entre 0 e  $\infty$ . Otra manera de definir  $I(t)$  es la siguiente:

$$I(t) = \frac{1 - \int_0^t E(t)dt}{\bar{t}} \quad (2.12)$$

en donde la integral es el área bajo la curva  $E(t)$  hasta un valor de  $t$  dado.

La función de intensidad  $A(t)$  se define como la fracción de fluido de edad  $t$  contenido en el recipiente que lo abandonará en un tiempo comprendido entre  $t$  y  $t + \Delta t$ . Esta función resulta útil para verificar la existencia de espacios muertos.

### 2.4.3. Relación entre las funciones de distribución de edad.

El balance macroscópico general de población se puede utilizar para relacionar  $E(t)$  e  $I(t)$ ; sin embargo se puede usar un método aún más sencillo y más general. La relación entre  $E(t)$  y  $I(t)$  está dada por la ecuación:

$$E(t) = -\bar{t} \frac{d}{dt} I(t) \quad (2.13)$$

La función  $\Lambda(t)$  también se puede relacionar con las funciones  $E(t)$  e  $I(t)$  mediante:

$$\Lambda(t) = \frac{1}{\bar{t}} \frac{E(t)}{I(t)} - \frac{d}{dt} [\ln \bar{t} I(t)] \quad (2.14)$$

Cualquiera de las funciones contiene la misma información básica. Sin embargo se aplican todas puesto que ciertos aspectos del flujo no ideal se visualizan más fácilmente con una función particular.

Por otra parte, las funciones de distribución de edad se pueden expresar en forma adimensional (lo que generalmente es útil durante el análisis) mediante la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad (2.15)$$

donde  $t$  es el tiempo registrado experimentalmente. De este modo las funciones descritas previamente se pueden redefinir de la siguiente forma:

$$E(\theta) = \bar{t} E(t) \quad (2.16)$$

$$I(\theta) = \bar{t} I(t) \quad (2.17)$$

$$E(\theta) = -\frac{d}{d\theta} I(\theta) \quad (2.18)$$

$$\Lambda(\theta) = \frac{E(\theta)}{I(\theta)} = \frac{E(t)}{I(t)} = \bar{t} \Lambda(t) \quad (2.19)$$

#### 2.4.4. Determinación experimental de las funciones de distribución de edad.

La determinación experimental de las funciones de distribución definidas anteriormente se realiza mediante la técnica de estímulo-respuesta, para la cual se utiliza una sustancia como trazador; esta sustancia puede ser un colorante, una disolución eléctricamente conductora o cualquier otro material. El trazador debe tener aproximadamente la misma densidad, viscosidad y otras propiedades de interés que la corriente de proceso con el fin de que la medida sea representativa de la mezcla. El trazador se inyecta en la corriente de entrada en forma de un escalón o de un pulso. La respuesta adimensional a una inyección en escalón de trazador se conoce como curva  $F$  y la respuesta adimensional a una inyección en pulso se conoce como curva  $C$  -que es el caso tratado en este trabajo. En la Figura 2.2 se presentan la curva adimensional para el trazador en la corriente del fluido que sale del tanque, curva  $F$  (con la concentración de trazador referida a la de la corriente de entrada  $c_0$ ), así como la curva adimensional de respuesta  $C$  (donde la concentración de referencia para el trazador es la que éste tendría si estuviera uniformemente distribuido en todo el tanque,  $c_0$ ).

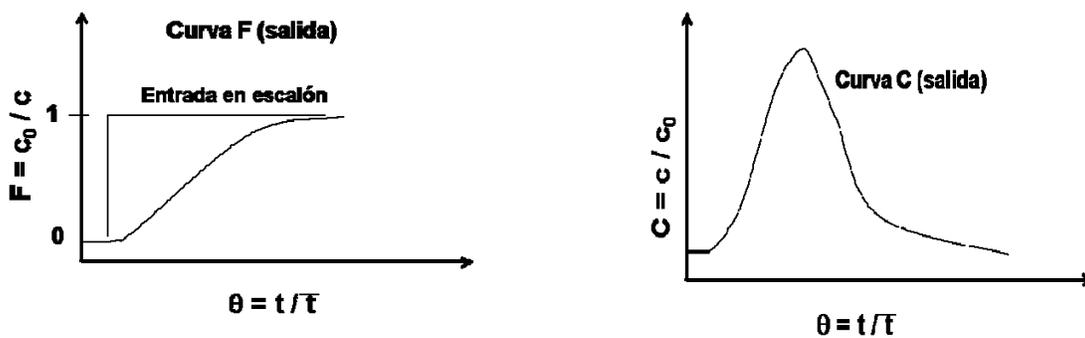


Figura 2.2.- Curvas  $F$  y  $C$  típicas del patrón de flujo en la corriente de salida de un reactor [9].

Con esta elección de variables el área bajo la curva  $C$  es:

$$\int_0^{\infty} C(\theta) d\theta = \int_0^{\infty} \frac{c(\theta)}{c_0} \quad (2.20)$$

El valor de  $c_0$  se puede obtener del área bajo la curva experimental de salida o a partir de los valores conocidos para la cantidad de trazador usado en la pulsación y el volumen de agua en el tanque.

Para un tanque cerrado existe una relación sencilla entre las curvas  $E$  y  $C$  y las curvas  $I$  y  $F$ . Si se toma  $t = 0$  como el instante de la inyección en forma de pulso todos los elementos de trazador del fluido tienen el mismo tiempo de partida para sus edades. Por lo tanto, la concentración de salida en función del tiempo, o curva  $C$ , es también un registro de la fracción de edad de los elementos de fluido (el trazador) que entraron en el tanque en  $t = 0$  y lo abandonan en  $t = t$ , que es precisamente lo mismo que la curva  $E$ , esto es:

$$C(\theta) = E(\theta) = \bar{t}E(t) \quad (2.21)$$

En otras palabras la distribución  $E$  se puede obtener inyectando un trazador (en forma de pulso) en el fluido de entrada al reactor y determinando las edades de los elementos de fluido a partir de la concentración de trazador en la salida.

Algunos ejemplos de las formas que adoptan las curvas obtenidas para la distribución  $E$  en los procesos reales, que corresponden en la práctica a condiciones de mezcla intermedia, y los dos casos extremos (flujo pistón y mezcla perfecta) mencionados anteriormente, se muestran en la Figura 2.3.

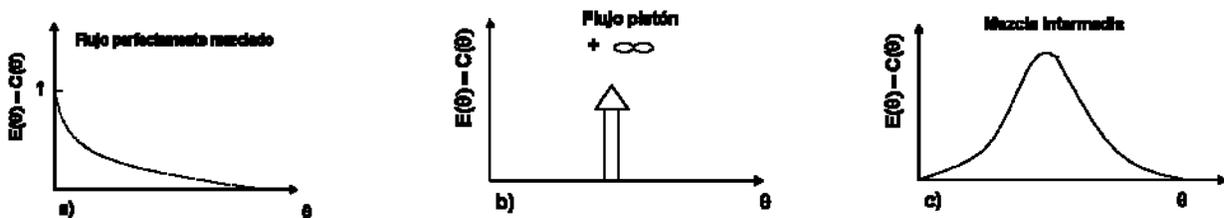


Figura 2.3.- Distribución de edad, interna y a la salida, para dos casos límite: a) mezcla completa; b) flujo pistón y c) un caso intermedio [10]

Por otro lado, la distribución  $F$  se relaciona con la distribución adimensional  $I$  mediante la expresión:

$$VI(t) = Q[1 - F(\theta)] \quad (2.22)$$

o bien por

$$I(\theta) = 1 - F(\theta) \quad (2.23)$$

de donde queda:

$$F(\theta) = 1 - I(\theta) \quad (2.24)$$

o de manera equivalente:

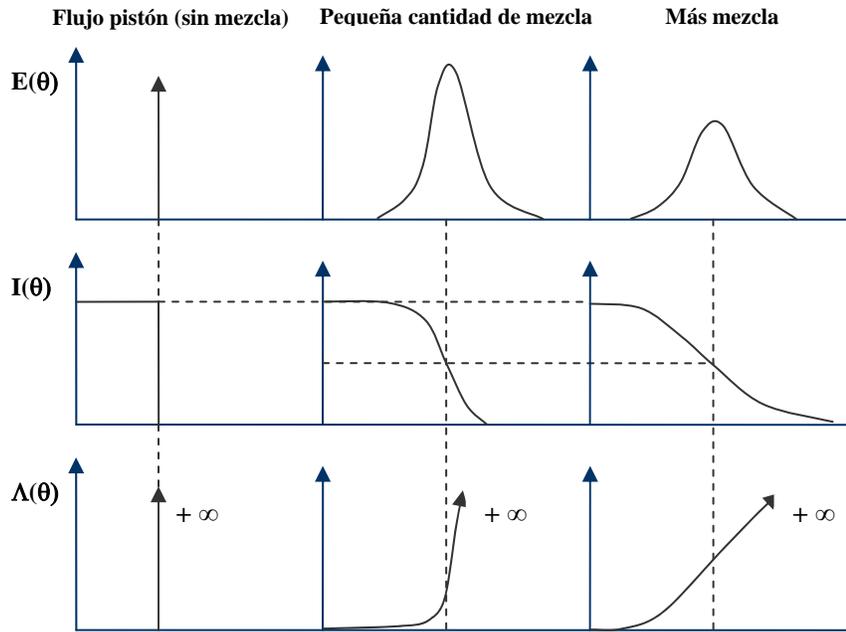
$$F(\theta) = \int_0^t E(\theta) d\theta \quad (2.25)$$

En resumen, las funciones teóricas de distribución de edad,  $E(\theta)$  e  $I(\theta)$ , se pueden medir experimentalmente para un tanque cerrado utilizando las respuestas de pulso y escalón,  $C(\theta)$  y  $F(\theta)$ , respectivamente.

#### **2.4.5. Interpretación de las funciones de distribución de edad.**

Los métodos de interpretación de las funciones de distribución de edad determinadas experimentalmente se clasifican en dos grupos: 1) procesos con un grado de mezcla relativamente pequeño y 2) procesos con grandes desviaciones de los modelos de flujo ideal [11].

Para el caso 1) las funciones de distribución de edad correspondientes tendrán las formas generales que se indican en la Figura 2.4.



**Figura 2.4.- Función de distribución de edad para un grado de mezcla relativamente pequeño [11].**

Los siguientes criterios permiten interpretar las gráficas obtenidas experimentalmente.

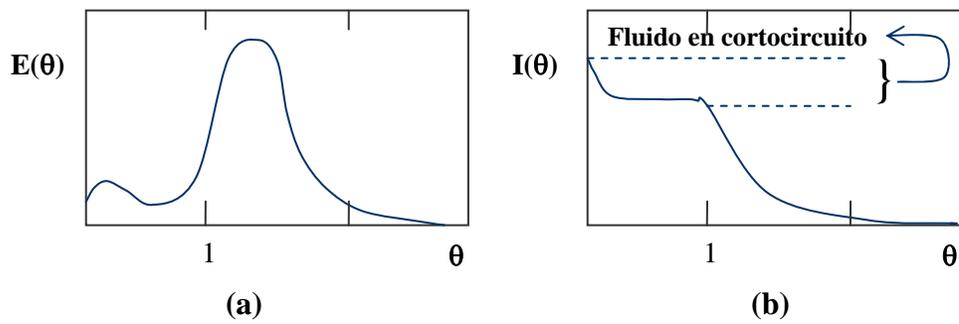
Para un pequeño grado de mezcla:

- i) El pico de la curva  $E(\theta)$  casi corresponderá al tiempo adimensional medio de residencia en que  $\theta = 1$ . La curva  $E(\theta)$  será casi simétrica respecto a este valor.
- ii) La curva  $I(\theta)$  tendrá un valor aproximado de 0.5 para  $\theta = 1$ .
- iii) Ninguna de las curvas tendrá colas excesivamente largas.
- iv) La curva  $\Lambda(t)$  será creciente, generalmente con un crecimiento rápido.

Las formas cualitativas de las curvas de edad permiten estimar el grado de mezcla en un proceso, mientras que la varianza se puede utilizar para obtener un valor cuantitativo con fines comparativos.

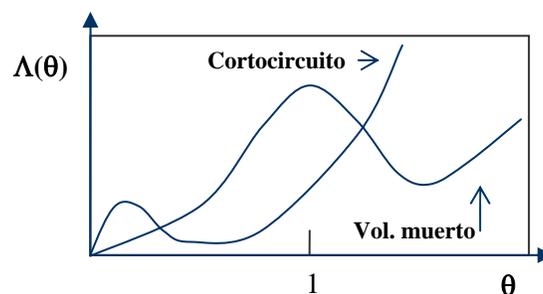
En general, una curva  $E(\theta)$  vs.  $\theta$  típica (ver Figura 2.4) proporciona la información más relevante sobre el tipo de comportamiento del fluido dentro del reactor. Sin embargo

cuando ésta se aleja de su forma típica, mostrando regiones irregulares, como sucede en la Figura 2.5 (a), es recomendable construir las funciones  $I(\theta)$  y  $\Lambda(\theta)$  para tener información más detallada que permita comparar e interpretar los resultados. Esta es la situación a la que se refiere el caso 2), situación en la que los procesos muestran grandes desviaciones de los modelos de flujo ideal, como es el caso del fluido en cortocircuito. La Figura 2.5 (a) y (b) muestra las curvas  $E(\theta)$  e  $I(\theta)$  típicas para el caso en que parte del fluido pasa por el distribuidor en cortocircuito.



**Figura 2.5.- Identificación de la existencia de fluido en cortocircuito para las funciones  $E(\theta)$  e  $I(\theta)$  [11].**

Por otra parte la Figura 2.6 muestra la forma que toma la curva  $\Lambda(\theta)$ .

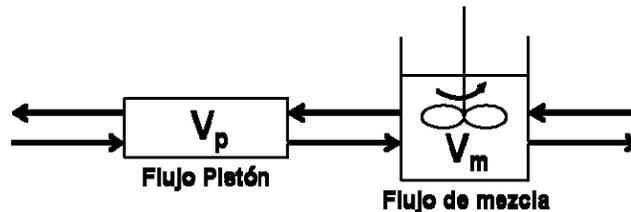


**Figura 2.6.- Efecto de cortocircuito y espacio muerto sobre la función de intensidad  $\Lambda(\theta)$  [11].**

#### **2.4.6. Modelo combinado para el flujo no ideal en un distribuidor de colada continua.**

Sahai y Emi [12] propusieron una corrección al modelo combinado que se venía usando por décadas, la cual se basa en la suposición inicial hecha sobre el cálculo del

volumen muerto. Estos autores suponen la existencia de dos regiones opuestas en cuanto al comportamiento del fluido en un reactor. Una de ellas corresponde al volumen activo,  $V_a$ , y la otra al volumen muerto,  $V_d$ . En el primer caso se encuentran combinados los conceptos ideales de flujo pistón ( $V_p/V$ ) y flujo de mezcla perfecta ( $V_m/V$ ) mencionados anteriormente. En este caso se considera que el fluido que pasa por un reactor puede ser representado por una combinación de regiones en las que existe el flujo pistón y después el flujo de mezcla perfecta o viceversa (Figura 2.7). El orden de las regiones no afecta a la respuesta que tiene el trazador para un tipo de inyección dado, es decir, el efecto es el mismo si el trazador pasa primero por la región de flujo pistón o si lo hace por la región de flujo de mezcla perfecta.



**Figura 2.7.- Modelo combinado, representación de volumen pistón y de mezcla perfecta [13].**

El segundo caso supone dos tipos de volumen muerto. El primer tipo considera que el líquido presente en la región muerta está completamente estancado y que el fluido nuevo que entra al reactor no entra a tal región de estancamiento –no hay mezcla. En el segundo tipo, el fluido presente en la región muerta se mueve lentamente debido al intercambio que existe con el fluido de la región activa –grado de mezcla mínimo. El movimiento lento ocasiona que esa parte del fluido esté más tiempo en el reactor que el resto del fluido. Este último caso es el más común en la mayoría de los distribuidores de colada continua bajo condiciones usuales de operación.

El modelo combinado permite calcular las fracciones de volumen muerto ( $V_d/V$ ) en un reactor a partir de las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia (RTD, por sus siglas en inglés) obtenidas experimentalmente mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \left( \frac{Q_a}{Q} \right) \bar{\theta}_c \quad (2.26)$$

en donde  $\bar{\theta}_c$  es el tiempo adimensional desde  $\theta = 0$  hasta  $\theta = 2$  y queda definido por:

$$\bar{\theta}_c = \frac{\text{tiempo medio medido hasta } \theta = 2}{\text{tiempo medio de residencia}} = \frac{\text{tiempo medido } \bar{t}_c}{\bar{t}} \quad (2.27)$$

o en términos de tiempos adimensionales:

$$\bar{\theta}_c = \frac{\int_0^2 \theta C(\theta) d\theta}{\int_0^2 C(\theta) d\theta} \quad (2.28)$$

Cuando los intervalos de tiempo son constantes la ecuación se puede escribir:

$$\bar{\theta}_c = \frac{\sum_{\theta=0}^2 E(\theta)_i \theta_i}{\sum_{\theta=0}^2 E(\theta)_i} \quad (2.29)$$

El área bajo la curva en el mismo intervalo está dado por:

$$\frac{Q_a}{Q} = \int_0^2 C(\theta) d\theta \quad (2.30)$$

o expresado en forma de sumatorias se tiene:

$$\frac{Q_a}{Q} = \Delta\theta \sum_{\theta=0}^2 E(\theta)_i \quad (2.31)$$

que representa la fracción de flujo volumétrico que pasa por la región activa.

La existencia de espacio muerto se verifica con más facilidad a partir de las características de la curva  $E(\theta)$ . Esta curva tendrá una cola muy larga que indica que el fluido se está quedando en el espacio muerto.

La fracción de flujo pistón ( $V_p/V$ ) se obtiene a partir de la curva RTD y la expresión que la representa es:

$$\frac{V_p}{V} = \theta_{\min} \quad (2.32)$$

donde  $\theta_{\min}$  es el tiempo adimensional correspondiente al momento en que se registra por primera vez el trazador en la salida del reactor y se obtiene a partir de la curva  $F(\theta)$  vs.  $\theta$ , cuando  $F(\theta) = 0.01$ . Por otra parte, la fracción de flujo de mezcla se calcula con la ecuación:

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_p}{V} - \frac{V_d}{V} \quad (2.33)$$

A partir de la curva RTD se puede calcular el tiempo medio adimensional mediante:

$$\bar{\theta} = \frac{\int_0^{\infty} \theta E(\theta) d\theta}{\int_0^{\infty} E(\theta) d\theta} \quad (2.34)$$

o expresado como sumatorias (cuando el paso de tiempo es constante):

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} E_i \theta_i}{\sum_{i=1}^{\infty} E_i} \quad (2.35)$$

### **Capítulo 3. Objetivo y alcance**

La técnica de inyección de gases que tiene como finalidad facilitar la remoción de inclusiones en el acero líquido ha sido usada en los últimos años por diferentes investigadores. Los resultados obtenidos dependen entre otras cosas de las dimensiones y diseño del distribuidor así como de las condiciones de operación en que se experimenta. Lo que se busca en éste trabajo al aplicar las cortinas de aire es incrementar los tiempos medios de residencia (de modo que se facilite la flotación) y el volumen de fluido tipo pistón. Además se pretende tener una noción del comportamiento del fluido bajo las condiciones de operación dadas más adelante con el fin de proponer una nueva ruta de estudio en la que posiblemente se sugiera un nuevo arreglo de dispositivos modificadores de flujo y/o diferentes condiciones de operación para las que se garantice el control del flujo y con ello un incremento en la calidad final del acero.

El objetivo de este trabajo es determinar los patrones y la calidad de flujo en un distribuidor (de dos hilos) de colada continua con y sin modificador de flujo mediante el modelado físico del reactor haciendo uso de técnicas estímulo-respuesta y de visualización (filmaciones), para esclarecer las razones del comportamiento observado con y sin modificador de flujo. El modificador de flujo consiste de dos cortinas de aire, una en cada lado del distribuidor.

Las variables de experimentación son el nivel de agua en el modelo físico del distribuidor (tres niveles), el flujo de agua en la entrada (dos flujos) y el flujo de aire aplicado para generar cada una de las cortinas de aire (dos flujos). El sistema se opera en condiciones isotérmicas (a temperatura ambiente) y la visualización del patrón de flujo se

realiza solo en un plano del modelo. Los resultados se analizan utilizando el modelo combinado de Sahai y Emi.

Los experimentos se dividen en dos bloques:

- 1) Experimentos sin cortinas de aire
- 2) Experimentos con cortinas de aire.

En el primer caso el objetivo específico es medir el efecto que tienen la variación del flujo de agua en la entrada así como el nivel de agua en el distribuidor sobre los patrones y calidad de flujo.

En el segundo caso se usa un solo flujo de agua en la entrada para todos los experimentos y el objetivo específico es medir el efecto que tienen la variación del flujo de aire aplicado para generar las cortinas de aire así como el nivel del agua en el distribuidor sobre los patrones y calidad de flujo.

## Capítulo 4. Desarrollo experimental

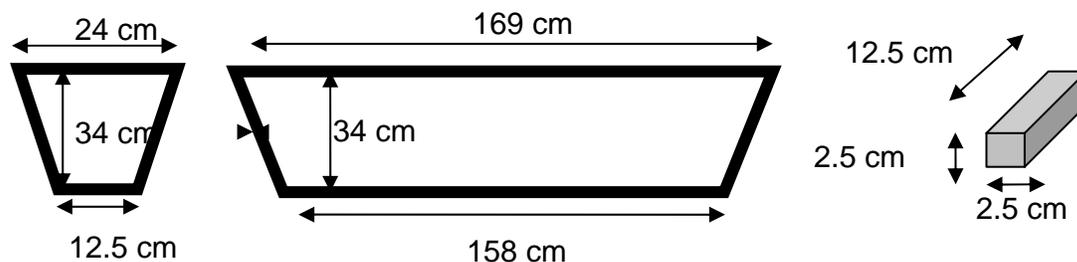
En este capítulo se describe tanto al equipo experimental utilizado así como a las técnicas experimentales y el diseño de los experimentos.

Para realizar los experimentos se utilizó un modelo físico de un distribuidor de colada continua de dos hilos. El trazador físico fue una disolución acuosa de ácido sulfúrico que se agregó a la corriente de alimentación del modelo del distribuidor en forma de adición en escalón. La respuesta del sistema se midió a la salida con un electrodo de pH. También se realizaron experimentos para visualizar el patrón de flujo al interior del modelo.

Se estudiaron dos grupos de condiciones de operación: 1) sin cortina de aire y 2) con cortina de aire. Dentro del primer grupo de experimentos se variaron tanto la altura del fluido como el flujo volumétrico de éste a la entrada del modelo; por otra parte, para los experimentos con cortina de aire se estudiaron varias alturas del fluido.

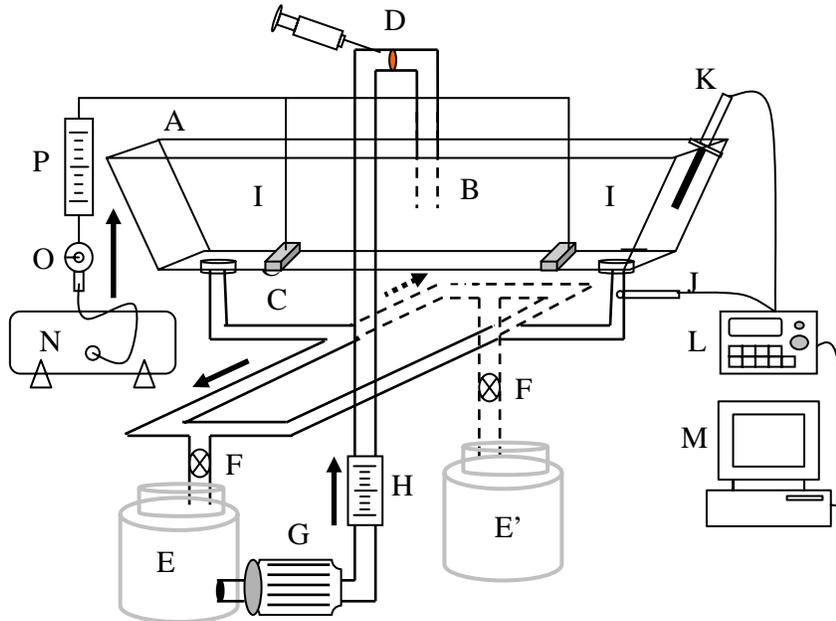
### 4.1 Equipo experimental

El modelo físico se construyó con acrílico de 6 mm de espesor y agua a temperatura ambiente (para simular al acero líquido a 1600 °C). Las dimensiones del modelo del distribuidor construido a escala se muestran en la Figura 4.1.



**Figura 4.1.- Dimensiones: a) del modelo físico y b) de las piezas de arena usadas para generar las cortinas de aire.**

El sistema experimental (ver Figura 4.2) se diseñó para poder agregar un trazador en la corriente de alimentación al distribuidor y medir la respuesta (como variación del pH con el tiempo) en una de las corrientes de salida del modelo.



**Figura 4.2.- Esquema del sistema y equipo empleado.**

Como se ve en la Figura 4.2, el sistema consiste del siguiente equipo:

- Modelo físico de distribuidor de colada continua construido a escala de 1/5 del tamaño real (A)
- Sistema de recirculación formado por un tinaco (E), una bomba (G), un recipiente de retención (E') y llaves que permiten mantener al sistema en estado estacionario (F)
- Rotámetro (H)
- pH-metro (L) con un electrodo de pH (J) y un detector de temperatura (K)
- Sistema computarizado de adquisición de datos (M)
- Compresor de aire (N) -que es la fuente de aire para generar la cortina de burbujas.

- Controlador de flujo (O) y un rotámetro (P) para el control de aire en la entrada del distribuidor.
- Dos piezas fabricadas con arena Shell (I) que, debido a su porosidad, permiten el paso de aire a través de ellas para generar las cortinas de aire. Se colocaron a 15 cm de cada salida.
- Jeringa de plástico de 5 ml (D)

Los materiales utilizados, además del agua que simula al acero líquido, son:

- Disolución acuosa de ácido sulfúrico (1:1).
- Disolución acuosa de tinta (colorante vegetal rojo 40 en polvo, diluido).

#### 4.2. Condiciones experimentales

Las mediciones a realizar se dividieron en dos bloques, según las condiciones experimentales en las que se operó el sistema, que se caracterizan por lo siguiente:

- I) Determinación de la evolución de la concentración de iones  $H^+$  en la salida del modelo físico sin presencia de cortinas de aire.
- II) Determinación de la evolución de la concentración de iones  $H^+$  en la salida del modelo físico en presencia de cortinas de aire.

En el primer bloque de experimentación se estudiaron, además, dos flujos de entrada de agua y tres niveles de agua en el distribuidor. La Tabla 4.1 muestra el arreglo de condiciones a las que se operó el sistema cuando no se usaron cortinas de aire.

**Tabla 4.1.- Variables de operación para experimentos en que no se usaron cortinas de aire.**

$Q_{\text{agua}}$ , L/min	NIVEL DE AGUA EN DISTRIBUIDOR (cm)		
20	7	12.5	18
30	7	12.5	18

Para los experimentos en que se usaron cortinas de aire se mantuvo fijo el flujo de agua en la entrada a 30 L/min para tres niveles de agua en el distribuidor y dos flujos de aire para generar las cortinas. La Tabla 4.2 muestra las condiciones en que se realizaron estos experimentos.

**Tabla 4.2.- Variables de operación para experimentos en que se usaron cortinas de aire.**

$Q_{\text{aire}}$ , L/min	NIVEL DE AGUA EN DISTRIBUIDOR (cm)		
7.7	7	12.5	18
10.7	7	12.5	18

### 4.3. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental para los experimentos sin cortinas de aire fue el siguiente:

- i) Verificación de nivelación del distribuidor respecto a la horizontal y de la buza de salida respecto a la horizontal, la vertical y a la superficie inferior del distribuidor. La buza debía estar centrada respecto al distribuidor evitando en lo posible cualquier ángulo diferente a  $90^\circ$  que ésta pudiera formar con el plano horizontal.
- ii) Calibración del pH-metro.
- iii) Instalación del electrodo del pH-metro en uno de los hilos del distribuidor.
- iv) Conexión del pH-metro con la computadora.
- v) Ajuste del flujo de agua en la entrada del distribuidor con el rotámetro.
- vi) Verificación de estado estable en el sistema. Mediante el manejo de llaves (abriendo y/o cerrando) se procuró mantener estable el nivel de agua requerido
- vii) Ajuste de pH del agua en el sistema en los casos en que fue necesario. Se utilizaron hojuelas de NaOH diluidas en agua o ácido sulfúrico. Se procuró que

el pH inicial del agua se mantuviera entre los valores de 7.9 y 8.9 para todos los experimentos.

- viii) Una vez verificados la estabilidad del nivel de agua en el distribuidor y del pH inicial se procedió a iniciar el *software* para la adquisición de datos de pH contra tiempo y, unos segundos después, a inyectar ya sea 5 ml de una solución de ácido sulfúrico (1:1) o bien 5 ml de una mezcla (a partes iguales) de colorante vegetal (Rojo 40) en polvo diluida en agua y ácido sulfúrico concentrado cuando fue el caso de filmar el comportamiento de la tinta en el distribuidor.
- ix) Cada experimento se hizo por triplicado

El procedimiento seguido para los experimentos en que se usaron cortinas de aire fue básicamente el mismo, con los siguientes puntos adicionales:

- i) Instalación de las piezas o pastillas de arena Shell a una distancia de 15 cm de cada una de las salidas o hilos del distribuidor, en la base del distribuidor. Cada pieza se conectó al flujometro el cual a su vez se conectó al compresor.
- ii) Ajuste de flujometro de aire a las condiciones de operación.

#### **4.4. Manejo de datos**

Para cada condición experimental se obtuvieron datos de pH como función del tiempo. Con el fin de adaptar estos datos para el cálculo de funciones de edad y calidad de flujo estos resultados se trataron de la siguiente manera:

- i) A partir de los datos originales de cada experimento se hizo una interpolación para generar datos separados uniformemente, dado que el adquisidor de datos no tiene una frecuencia de adquisición constante.

- ii) Los datos de pH vs. t obtenidos para cada experimento se redefinieron con respecto al valor inicial con el fin de obtener una nueva tabla de valores cuyo valor inicial de pH fuera cero.
- iii) Los datos de pH vs. tiempo -ya redefinidos- de cada triada de experimentos se usaron para verificar la reproducibilidad construyendo curvas  $\Delta\text{pH}$  vs. t.
- iv) Se promediaron los datos redefinidos de cada triada de experimentos con el fin de obtener una sola tabla de valores pH vs. t para cada condición experimental.
- v) Los datos de pH se convirtieron a datos de concentración de iones  $\text{H}^+$  ( $c_{[\text{H}^+]}$ ) mediante la relación:  $c_{[\text{H}^+]}(t) = 10^{-\text{pH}}$ .
- vi) Los datos resultantes de (v) se redefinieron respecto al valor inicial de acuerdo a:  $c(t) = c_{[\text{H}^+]}^*(t) - c_{[\text{H}^+]}^*(0)$  (para que la curva RTD empezara en cero).
- vii) Los datos de la evolución de la concentración se utilizan para realizar cálculos de calidad de flujo (ver Capítulo 6).

## Capítulo 5. Resultados

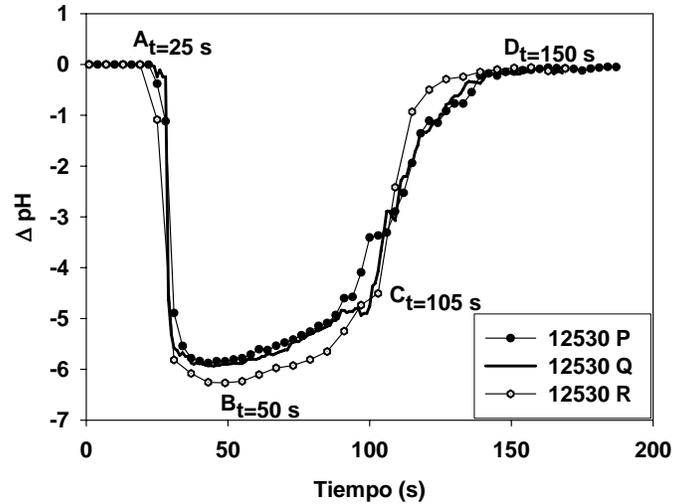
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la experimentación en el orden siguiente: 1) respuesta normalizada del sistema -curvas  $\Delta\text{pH}$  vs.  $t$ , referido al instante en que se inyectó el trazador y 2) visualización del flujo. Recuérdese la nomenclatura utilizada para identificar a los experimentos:

WWWYYZZ.Z

donde “WWW” (en ocasiones sólo “WW”) indica el valor de la altura (en mm) del nivel de agua en el distribuidor; “YY” es el valor del flujo volumétrico de agua (en L/min) en la entrada del distribuidor y “ZZ.Z” (en ocasiones sólo “Z.Z”) es el valor del flujo volumétrico de aire (en L/min) alimentado para generar las cortinas de burbujas. Para los experimentos sin cortina de aire la nomenclatura se reduce a WWYY. También dentro de la notación se usa frecuentemente “H” y representa el nivel de agua en el distribuidor.

### 5.1 Reproducibilidad y manejo de datos

Para cada combinación de condiciones experimentales se realizaron experimentos por triplicado con el fin de verificar la reproducibilidad. Dado que el pH inicial en los tres experimentos no fue el mismo se procedió a redefinir con respecto al valor inicial de pH a los datos obtenidos de la interpolación con el fin de que el nuevo conjunto de datos de cada curva tuviera un solo origen y de ese modo facilitar comparaciones entre ellas; a esta variable se le renombró como  $\Delta\text{pH}$ . De igual manera, restando algunos segundos a los valores de tiempo, se redefinió a la escala de tiempo para que su origen representara al instante en el que se hizo la inyección de trazador. La Figura 5.1 muestra las curvas correspondientes al experimento 12530. Como puede apreciarse, la reproducibilidad de los experimentos es buena con lo que se garantiza la calidad de los datos.

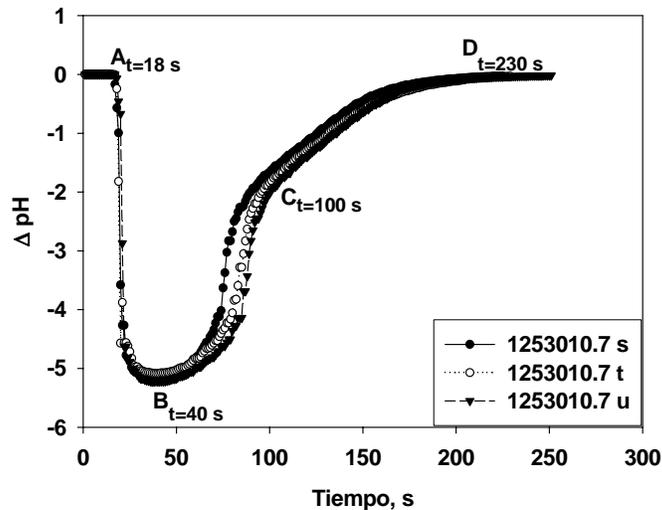


**Figura 5.1.- Variación del  $\Delta\text{pH}$  con respecto al tiempo, en tres experimentos (P, Q y R) para la condición  $H = 125 \text{ mm}$ ,  $Q_{\text{agua}}=30 \text{ L/min}$ , sin cortinas de aire.**

El signo negativo que aparece en la escala de valores  $\Delta\text{pH}$  significa que la disolución se hace cada vez más ácida. En la Figura 5.1 el punto A representa el tiempo que tarda el trazador en recorrer la distancia comprendida entre el punto de inyección ( $t_0 = 0$ ) y uno de los hilos en la salida del distribuidor - lugar en que está colocado el electrodo medidor de pH - y tiene un valor aproximado de  $t = 25 \text{ s}$  para la curva 12530 R. En este intervalo de tiempo pasaron aproximadamente 12.5 L de agua y no hay cambio en los valores de pH. Del punto A al punto B pasa el volumen de agua (también de 12.5 L) más concentrado en trazador provocando que haya un salto brusco en las lecturas de pH con lo que se llega a un valor mínimo (en esta escala) de aproximadamente  $\Delta\text{pH} = -6.5$  en B. Entre los punto B y C pasa un volumen de agua mayor (27.5 L) pero la diferencia entre los valores correspondientes de  $\Delta\text{pH}$  ( $\approx 1.8$ ) es relativamente pequeña. En el intervalo de tiempo de C a D salen del distribuidor alrededor de 22.5 L de agua y la diferencia en los correspondientes valores de  $\Delta\text{pH}$  es aproximadamente de 4.7, lo que indica una mayor variación en la concentración respecto al tiempo si se compara con el intervalo B-C.

Finalmente, en el punto D el trazador inyectado ha salido por completo del distribuidor, como lo indica el hecho de que se registran valores de pH similares a los iniciales.

Una triada de curvas equivalentes, pero para los experimentos 1253010.7 (con cortinas de aire) se muestra en la Figura 5.2.

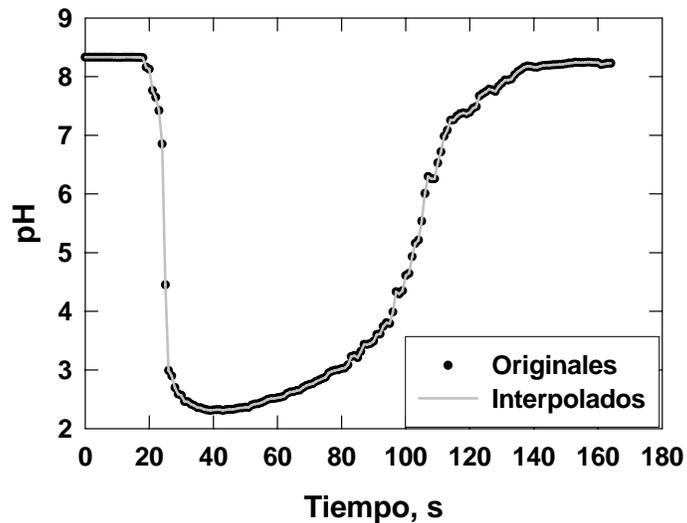


**Figura 5.2.- Variación del  $\Delta\text{pH}$  con respecto al tiempo, en tres experimentos para la condición  $H = 125 \text{ mm}$ ,  $Q_{\text{agua}}=30 \text{ L/min}$  y  $Q_{\text{aire}}=10.7 \text{ L/min}$ .**

Como se puede notar la reproducibilidad es buena. En este caso también se identifican cuatro puntos. El punto A corresponde al tiempo en que empieza a ser detectado el trazador en la buza de salida. Del punto A al punto B han pasado 22 segundos y han salido aproximadamente 11 L de agua. En el punto B se registra la máxima concentración de trazador ( $\Delta\text{pH} \approx -5$ ). En el intervalo de B a C salen 30 L de agua y el cambio en valores de  $\Delta\text{pH}$  es aproximadamente de 3.5.

El primer paso en el manejo de datos consistió en tomar la información de pH y tiempo originales de cada experimento y hacer una interpolación para generar una nueva

tabla de valores y la gráfica correspondiente. La Figura 5.3 muestra un ejemplo de interpolación para el experimento 12530 (H=125 mm de nivel o altura de agua en el distribuidor, 30 L/min de agua y sin cortinas de aire). Como se observa, la operación de interpolación no afectó a la forma de la curva.



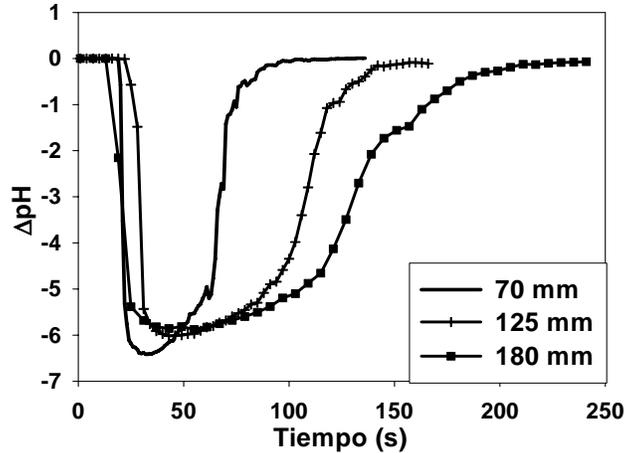
**Figura 5.3.- Datos experimentales (puntos) e interpolados (línea) para el experimento 12530.**

El siguiente paso fue obtener una curva promedio a partir de los datos redefinidos de cada triada de curvas con el fin de trabajar un solo conjunto de valores  $\Delta\text{pH}$  vs. tiempo. Estas curvas promedio se analizaron visualmente para establecer tendencias en función de las variables independientes ( $t$ ,  $H$  y  $Q_{\text{agua}}$ ).

## **5.2. Experimentos sin cortinas de aire (curvas pH vs. tiempo)**

### **5.2.1 Efecto del nivel de agua**

La Figura 5.4 muestra el efecto de la variación del nivel de agua del distribuidor sobre el tiempo que tarda el trazador en salir del modelo físico, manteniendo constante el flujo de agua en la buza de entrada.



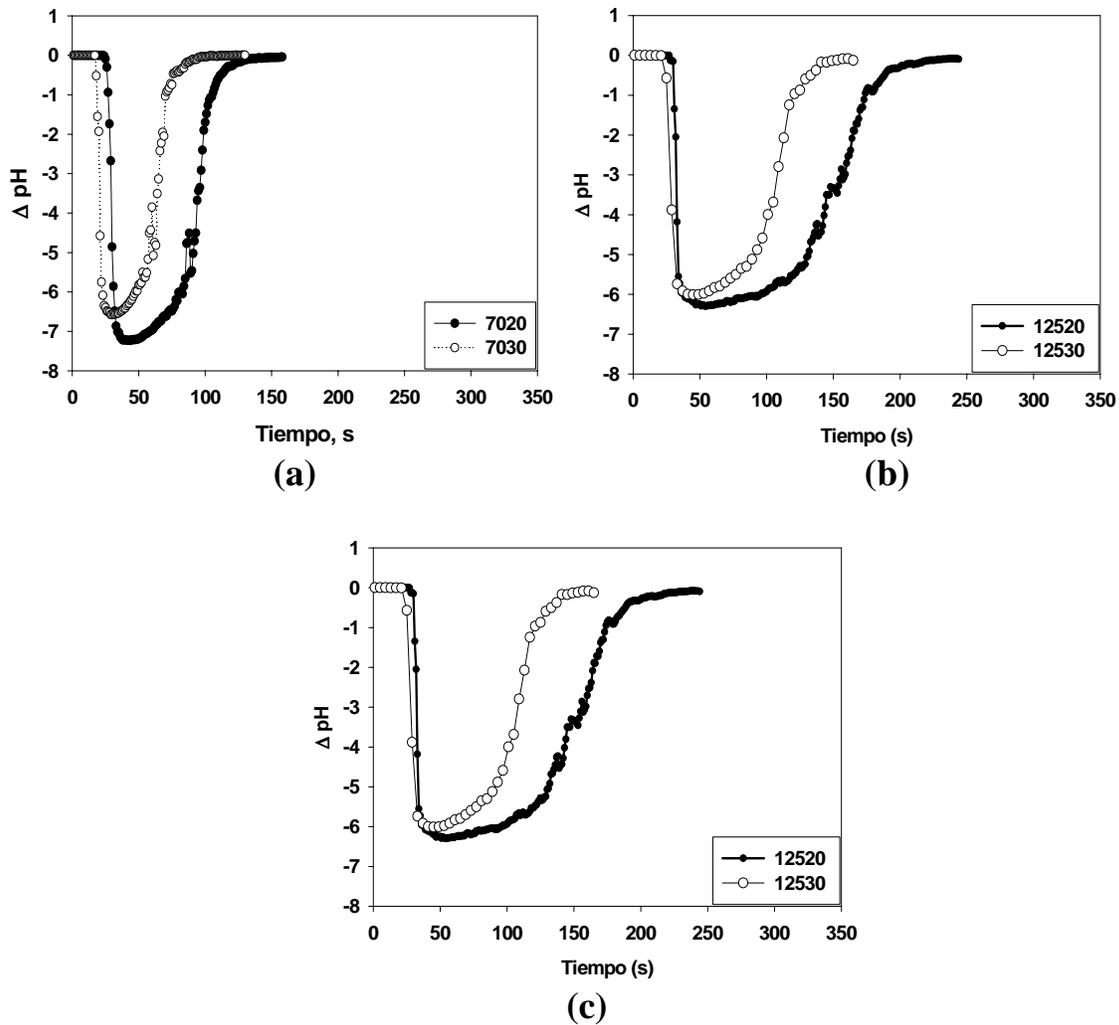
**Figura 5.4.- Variación del  $\Delta\text{pH}$  con respecto al tiempo, para tres niveles de agua en el distribuidor con  $Q_{\text{agua}} = 30 \text{ L/min}$  constante.**

Esta gráfica muestra que la cola de las curvas se desplaza cada vez más hacia la derecha a medida que el nivel de agua en el reactor aumenta, es decir que el tiempo para regresar a la condición inicial de pH aumenta a medida que aumenta el nivel del agua. Se nota que los valores mínimos de  $\Delta\text{pH}$  mostrados (valores más negativos en esta escala) para las diferentes curvas muestran tendencia a desplazarse a valores menos negativos a medida que aumenta el nivel de agua en el distribuidor.

Se observó la misma tendencia para la serie de experimentos en la que se usó un flujo de agua en la entrada de 20 L/min.

### **5.2.2 Efecto del flujo de agua en la entrada**

La respuesta que mostró el sistema cuando se mantuvo el nivel de agua constante y se usaron diferentes valores de flujo en la entrada (20 y 30 L/min) se muestra en la Fig. 5.5.



**Figura 5.5.- Variación del  $\Delta\text{pH}$  con respecto al tiempo para dos valores de flujo de agua en la entrada ( $Q_{\text{agua}} = 20$  y  $30$  L/min) con (a)  $H=70$  mm, (b)  $H=125$  mm y (c)  $H=180$  mm constantes.**

De las gráficas anteriores se nota que el tiempo que tarda el trazador en pasar por el distribuidor disminuye al aumentar la cantidad del flujo de agua en la entrada; las colas de las curvas 7020, 12520 y 18020 están desplazadas hacia la derecha con respecto a las curvas en las que  $Q_{\text{agua}}=30$  L/min. En las gráficas 5.5 (a) y (b) se ve que, las curvas “30’s” están más abajo que las “20’s”. En las curvas para  $H=180$  mm no sucede lo mismo si no que se juntan cuando los valores de  $\Delta\text{pH}$  son los mínimos.

### 5.3 Experimentos con cortinas de aire (curvas pH vs. tiempo)

#### 5.3.1 Efecto de la presencia de cortina de aire

Las curvas de la Figura 5.6 muestran el comportamiento del trazador con respecto al tiempo cuando se aplican dos flujos de aire diferentes y se mantiene constante el nivel de agua en el distribuidor.

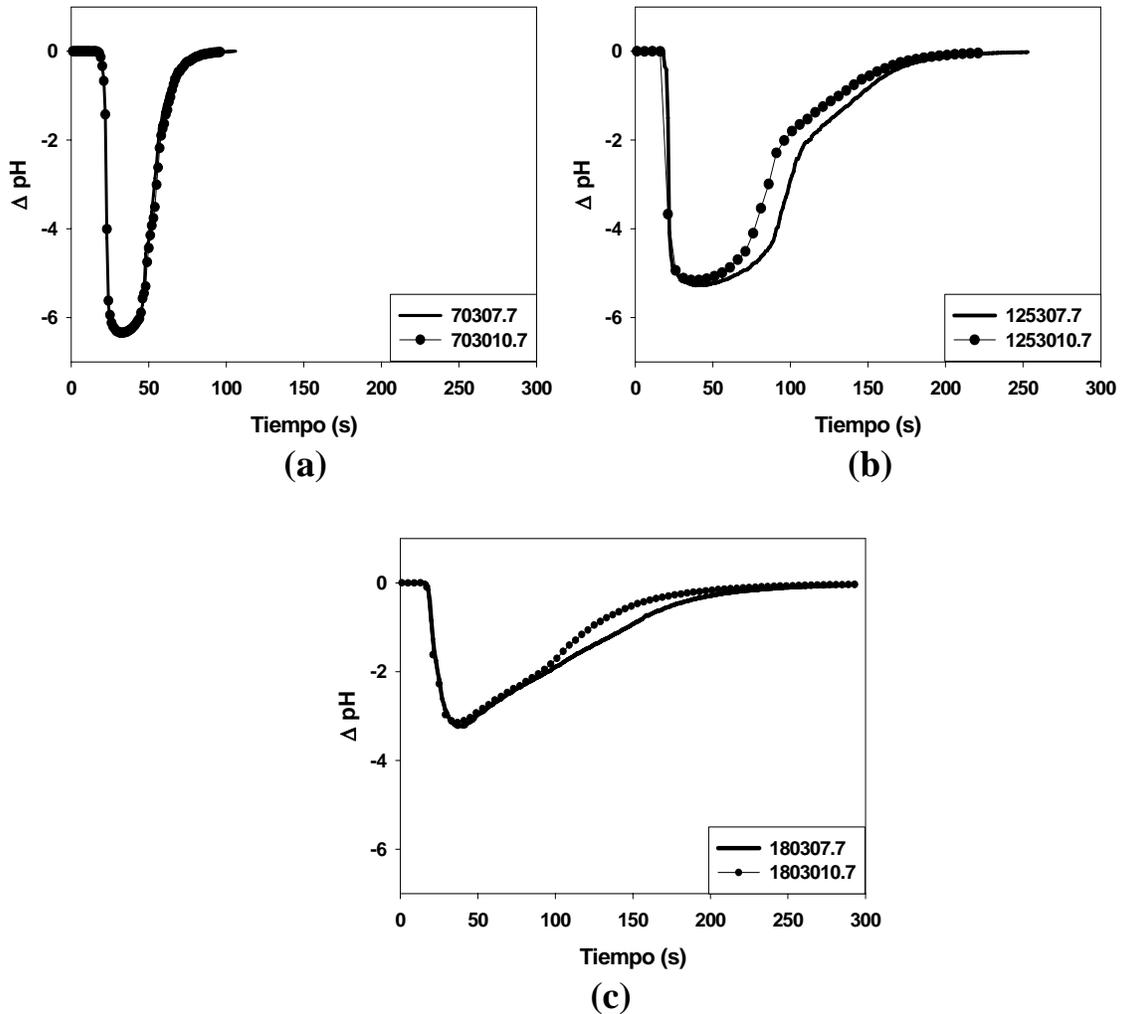


Figura 5.6.- Variación del  $\Delta \text{pH}$  con respecto al tiempo para dos valores de flujo de aire ( $Q_{\text{aire}} = 7.7$  y  $10.7$  L/min), con (a)  $H=70$  mm, (b)  $H=125$  mm y (c)  $H=180$  mm.

De la Figura 5.6 (a) se aprecia que no hay diferencias en el comportamiento del trazador al aplicar un flujo de aire o el otro para generar las cortinas. En este caso la

máxima concentración de trazador se registra a un valor de  $\Delta\text{pH} \approx -6.5$  y todo el trazador ha salido del distribuidor en un lapso de 90 segundos aproximadamente.

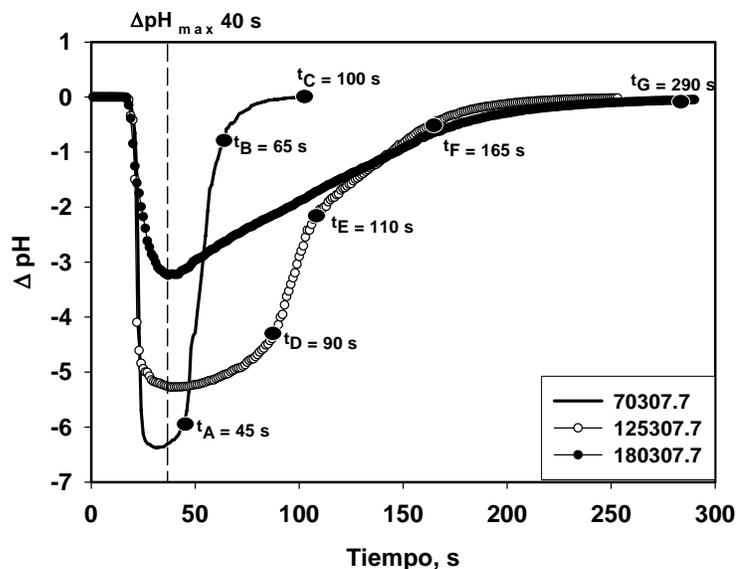
Para 125 mm de nivel de agua (Figura 5.6 (b)) se observa un comportamiento similar entre las curvas, sin embargo, la curva 125307.7 indica que el electrodo detectó un paquete de fluido con trazador que tardó más tiempo en salir del reactor que el correspondiente de la curva 1253010.7, aunque para  $t = 200$  las curvas se vuelven a juntar. En estos experimentos se alcanzaron valores mínimos de  $\Delta\text{pH} \approx -5.5$ .

Cuando el nivel de agua es de 180 mm el comportamiento de las curvas indica que en el experimento 1803010.7 el trazador estuvo más disperso o menos concentrado como lo muestra la Figura 5.6 (c) a partir de los 100 segundos. En estos casos tampoco hay variaciones en los tiempos de permanencia por efecto de la variación en los valores de  $Q_{\text{aire}}$ . En estas curvas los valores máximos de concentración son de  $\Delta\text{pH} \approx -3.5$ .

### **5.3.2 Efecto del nivel de agua**

En esta subsección se muestra el efecto que tiene el nivel de agua en el modelo del distribuidor sobre la evolución de la concentración de iones  $\text{H}^+$  en la salida del modelo, manteniendo los flujos de agua y de aire constantes.

En la Figura 5.7 se muestra la variación de los valores de  $\Delta\text{pH}$  con respecto al tiempo para los experimentos en que se usó un flujo de aire de 7.7 L/min, un flujo de agua en la entrada del modelo de 30 L/min y tres niveles de agua.



**Figura 5.7.- Variación del  $\Delta\text{pH}$  con respecto al tiempo para tres niveles de agua en el distribuidor y  $Q_{\text{aire}} = 7.7 \text{ L/min}$ ,  $Q_{\text{agua}} = 30 \text{ L/min}$ .**

En la Figura 5.7 se nota que con el aumento en el nivel de agua los valores máximos de concentración de iones  $\text{H}^+$  en las curvas disminuyen. También se observa que alrededor de los 20 segundos se da un descenso rápido en los valores de  $\Delta\text{pH}$  que se detiene cuando cada una llega a su valor máximo de concentración que es aproximadamente a los 40 segundos en las tres curvas, ver línea punteada  $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$  en la Figura 5.7. En este lapso de tiempo la variación de  $\Delta\text{pH}$  con respecto al tiempo se mantiene casi constante para las curvas 703010.7 y 1253010.7 y es ligeramente diferente para la curva 1803010.7, sin embargo a partir de los 40 segundos y hasta que termina de salir todo el trazador el comportamiento cambia.

Para la curva 70307.7 el primer cambio se nota entre los 40 y los 45 segundos ( $t_A = 45 \text{ s}$ ), intervalo en el que salen 2.5 L de agua y hay un cambio en el valor de  $\Delta\text{pH} \approx 0.5$ , o en otros términos  $\Delta(\Delta\text{pH} \approx 0.5)$ . Del punto  $t_A = 45 \text{ s}$  al  $t_B = 65 \text{ s}$  la forma de la curva es la de una línea recta que indica que la variación de pH con el tiempo es constante; en este

intervalo salieron 10 L de agua y el valor  $\Delta\text{pH} \approx 5.3$ . Del punto  $t_B$  y hasta que sale todo el trazador ( $t_C = 100$  s) el cambio de los valores de pH con respecto al tiempo no es constante; en este intervalo salen 17.5 L de agua y el cambio en el valor  $\Delta\text{pH} \approx 0.5$ .

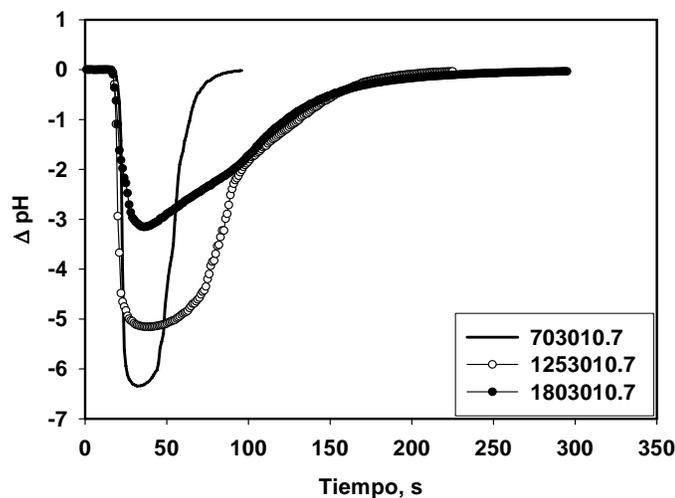
Es en la curva 125307.7 en la que se aprecian más cambios: de  $\Delta\text{pH}_{\text{max}}$  al punto  $t_D = 90$  s el comportamiento no es rectilíneo, salieron 25 L de agua y el cambio en el valor  $\Delta\text{pH} \approx 1.1$ . En el intervalo de  $t_D$  a  $t_E$  el cambio en valores de  $\Delta\text{pH}$  es constante respecto al tiempo, salieron 10 L de agua y el cambio en el valor  $\Delta\text{pH} \approx 2.0$ . Nuevamente, de  $t_E$  a  $t_F$  se tiene una línea recta; entre estos dos instantes salieron 27.5 L de agua del distribuidor y el cambio en concentración de iones  $\text{H}^+$  fue  $\Delta\text{pH} \approx 1.5$ . De  $t_F$  y hasta que sale por completo el trazador el cambio en el valor  $\Delta\text{pH}$  fue de aproximadamente 0.5.

La curva 180307.7 es muy suave: de  $\Delta\text{pH}_{\text{max}} \approx 40$  s al punto  $t_F = 165$  s el cambio de los valores de pH con respecto al tiempo es constante. En ese intervalo de tiempo salen 62.5 L de agua del distribuidor y se da un cambio en el valor  $\Delta\text{pH} \approx 4.6$ . De  $t_F$  y hasta que sale por completo el trazador ( $t_G = 290$  s) salieron 62.5 L de agua y hubo un cambio en el valor  $\Delta\text{pH} \approx 0.5$ .

El relativamente poco volumen de agua presente en el distribuidor cuando el nivel de agua es de 70 mm facilita que el trazador se mueva como un paquete más o menos compacto que abandona el reactor rápidamente lo cual se refleja en la forma de la curva. Cuando el nivel de agua es de 125 mm los cambios de la curva indican que aunque el trazador está distribuido en todo el volumen de agua también está siendo concentrado en paquetes de fluido que salen continuamente. Finalmente, cuando el nivel de agua es de 180 mm las cortinas de aire provocan que el trazador se distribuya *uniformemente* en el

volumen de agua presente (que es relativamente grande) y tarde más tiempo en salir pues tiene más espacio para moverse antes de entrar a alguna corriente que lo lleve a la salida.

En la Figura 5.8 se muestra la variación de los valores de  $\Delta\text{pH}$  con respecto al tiempo para los experimentos en que se usó un flujo de aire de 10.7 L/min, un flujo de agua en la entrada del modelo de 30 L/min y tres niveles de agua. Como puede observarse, las características de las curvas son similares a las descritas para la Figura 5.7.

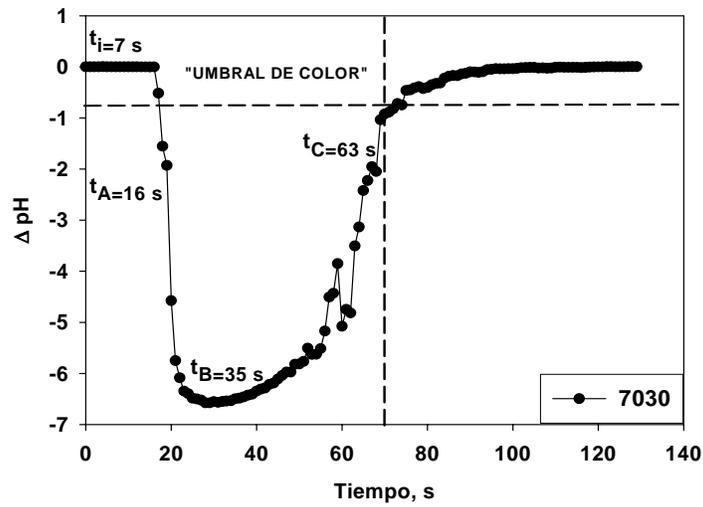


**Figura 5.8.- Variación del  $\Delta\text{pH}$  con respecto al tiempo para tres niveles de agua en distribuidor y  $Q_{\text{aire}} = 10.7 \text{ L/min}$ ,  $Q_{\text{agua}} = 30 \text{ L/min}$ .**

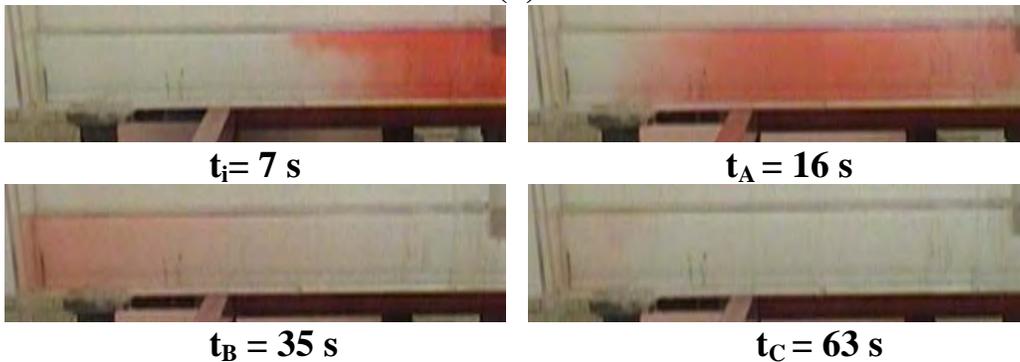
## 5.4 Experimentos sin cortinas de aire (patrones de flujo)

### 5.4.1 Efecto del nivel de agua

En la Figura 5.9 (b) se muestran algunas instantáneas para el experimento 7030; la Figura 5.9 (a) muestra los tiempos correspondientes en la curva  $\Delta\text{pH}$  vs. tiempo.



(a)



(b)

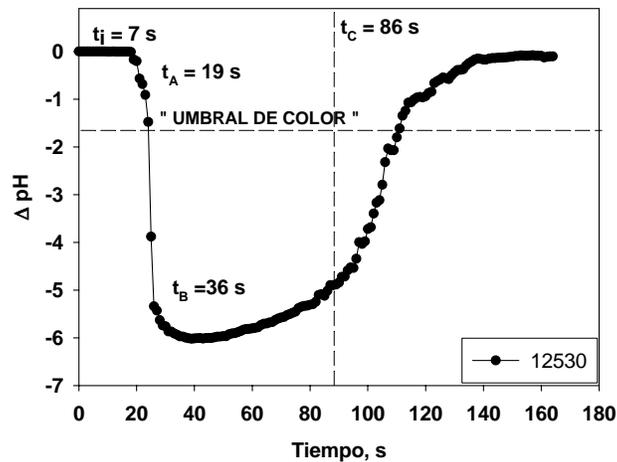
**Figura 5.9.- Experimento 7030: (a) Curvas  $\Delta pH$  vs. tiempo y (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor. La línea punteada indica el umbral debajo del cual, visualmente, ya no se distingue colorante.**

De la Figura 5.9 (b) se ve que, para el instante  $t_i = 14$  s, el colorante se mueve más rápido en la parte superior y, a medida que se aproxima a la salida ( $t_A = 23$  s), ésta se mueve más rápido en la parte inferior del distribuidor. En el instante  $t_B = 35$  s el colorante se concentra en el extremo del distribuidor y, limitado por las paredes del mismo, ocupa todo el espacio cercano a la salida. En  $t_C = 63$  s el trazador sigue ocupando el espacio del extremo del distribuidor y para este instante empieza a ser difícil visualizar la presencia de colorante aunque, como se puede apreciar de la Figura 5.9 (a) (línea vertical punteada), a los 70 segundos el electrodo en la salida todavía detecta la presencia de trazador. En estos casos se debe considerar que existe un “umbral” de color que el ojo puede detectar, pues a

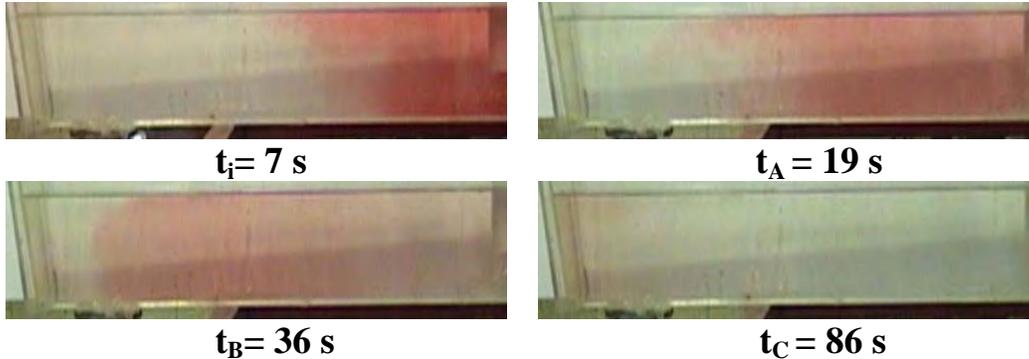
tiempos relativamente grandes el pH-metro sigue registrando la presencia de trazador, mientras que el ojo humano ya no puede hacer lo mismo con el color.

El patrón de flujo observado en las fotografías de los experimentos 7020's fue similar.

Para los experimentos 12530 la gráfica y las fotografías correspondientes para algunos instantes son:



(a)



(b)

Figura 5.10.- Experimento 12530: (a) curvas  $\Delta \text{pH}$  vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor.

En la Figura 5.10 (b) se ve que para el instante  $t_i = 7$  s el fluido se mueve más rápido en la parte superior. Para  $t_A = 19$  s esa misma porción de fluido llega primero a la buza de salida que el resto. Cuando  $t_B = 36$  s la mayor parte del colorante se concentra en la salida y

otra más pequeña pasa hacia las esquinas o extremo del distribuidor en donde se empieza a estancar, como se puede apreciar en la Figura 5.10 (b) para  $t_c = 86$  s.

De las Figuras 5.10 (b) en  $t_c = 86$  s y 5.10 (a) se aprecia nuevamente que existe un “umbral” de color para el que empieza a ser difícil detectar la presencia de colorante a simple vista aún cuando en el distribuidor quede todavía parte de él.

#### 5.4.2 Efecto del flujo de agua en la entrada (patrones de flujo)

De la Figura 5.11 se puede hacer una comparación entre los flujos de agua aplicados:

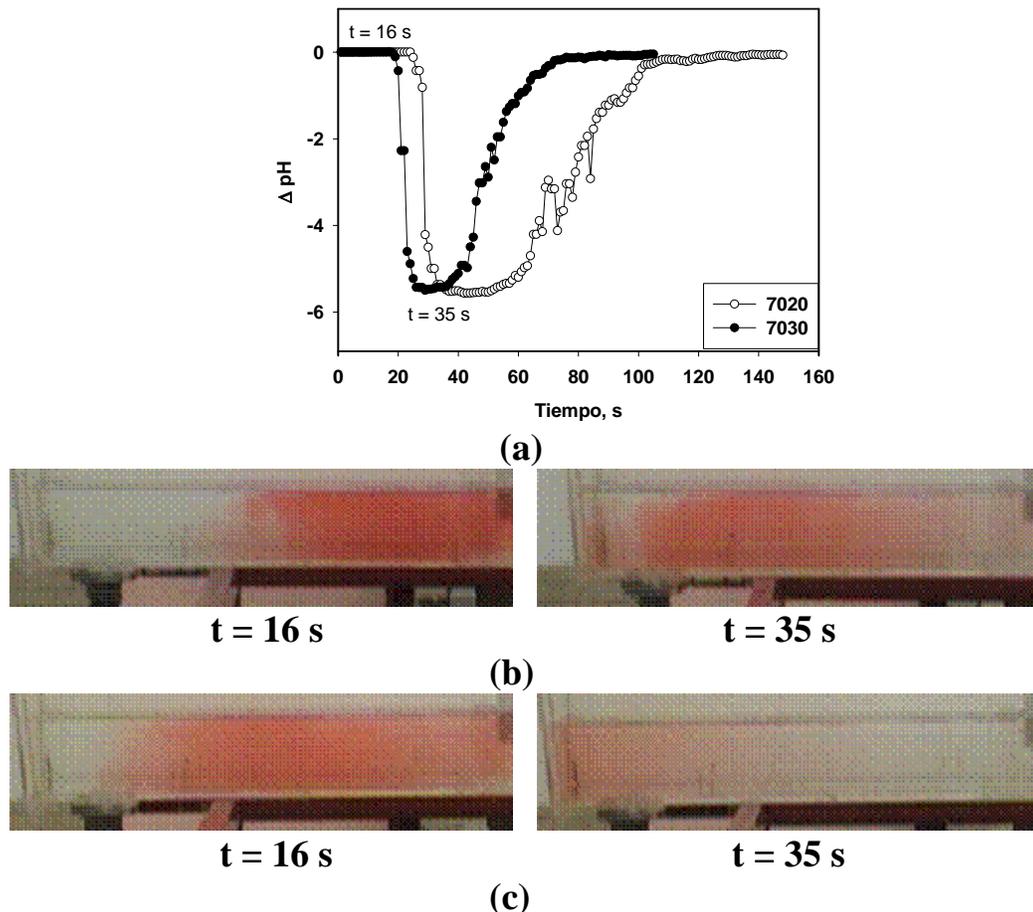


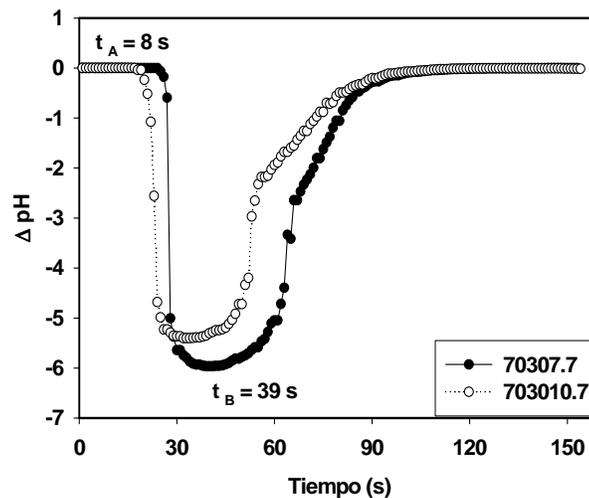
Figura 5.11.- Experimentos 7020 y 7030: (a) curvas  $\Delta pH$  vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor (experimento 7020) y (c) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor (experimento 7030).

Las instantáneas de la Figura 5.11 (b) muestran el retraso que lleva el trazador del experimento 7020 respecto a la 7030 para 16 y 35 segundos después de la inyección de trazador. El mismo efecto se nota al inicio de las curvas en Figura 5.11 (a) pues la curva 7030 registra valores de pH más altos a tiempos menores si se compara con la curva 7020.

## 5.5 Experimentos con cortinas de aire (patrones de flujo)

### 5.5.1 Efecto de la presencia de la cortina de aire

El efecto que tiene la variación en el flujo de aire aplicado al sistema se muestra en la Figura 5.12.



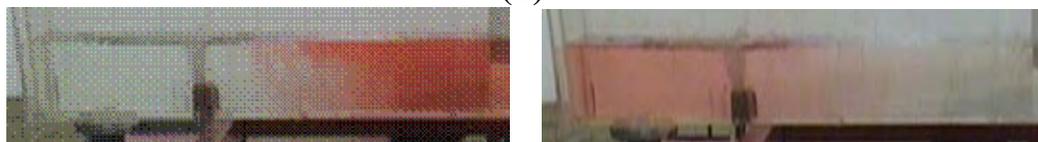
(a)



$t_A = 8 \text{ s}$

$t_B = 39 \text{ s}$

(b)



$t_A = 8 \text{ s}$

$t_B = 39 \text{ s}$

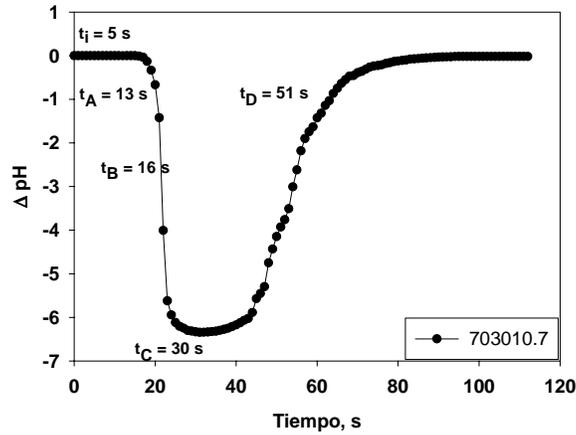
(c)

Figura 5.12.- Experimentos 70307.7 y 703010.7: (a) curvas  $\Delta\text{pH}$  vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor (experimento 70307.7) y (c) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor (experimento 703010.7) .

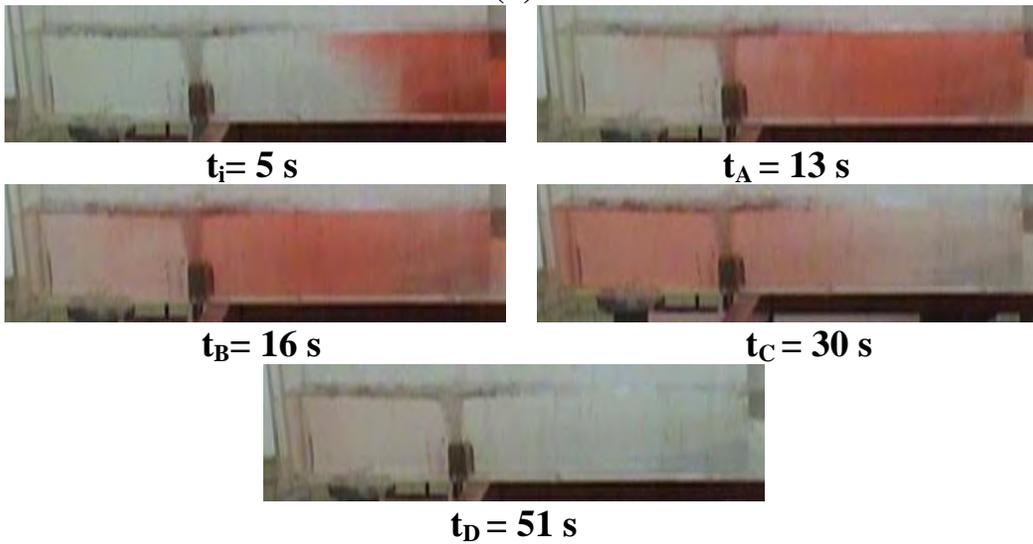
La curva 70307.7 de la Figura 5.12 (a) muestra diferencias respecto a la curva 703010.7: 1) alcanza valores de  $\Delta\text{pH}$  más bajos y 2) el trazador tarda más tiempo en salir del distribuidor. Sin embargo los cambios en la forma de la curva durante el tiempo de experimentación son los mismos en ambos casos. Lo anterior y el punto 2) se pueden confirmar con las imágenes de la Figura 5.12 (b) y (c): antes de cruzar la cortina de aire ( $t_A = 8$  s) el patrón de flujo es muy parecido para los dos experimentos, Figura 5.12 (b), sin embargo, para  $t_B = 39$  s se distingue una mayor cantidad de colorante del lado derecho de la cortina en el experimento 703010.7 que en el experimento 70307.7 lo que indica que la cortina de burbujas en el primer caso detiene más fluido y lo retarda para salir. En ambos experimentos se aprecia que después de pasar la barrera de burbujas el colorante se distribuye homogéneamente entre la pared del distribuidor y la misma cortina. A este nivel de agua en el distribuidor la cortina de aire provoca un patrón de flujo similar en ambas condiciones de operación.

### **5.5.2 Efecto del nivel de agua**

La Figura 5.13 muestra las instantáneas y sus correspondientes curvas  $\Delta\text{pH}$  vs. tiempo para los experimentos en que se utilizó un valor constante  $Q_{\text{aire}}=10.7$  L/min y tres niveles de agua en el distribuidor.



(a)



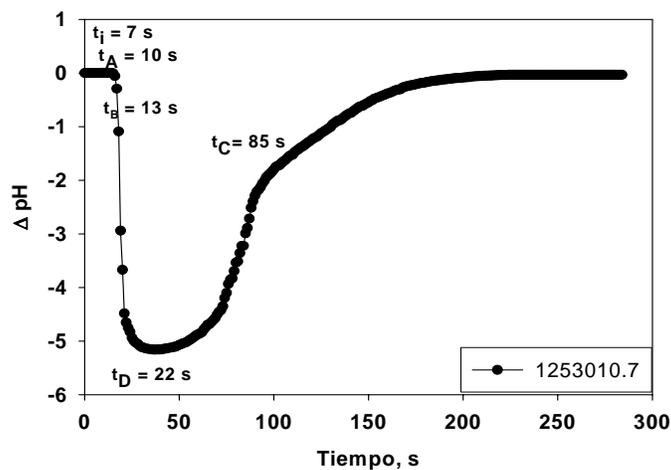
(b)

Figura 5.13.- Experimento 703010.7: (a) curvas  $\Delta pH$  vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor.

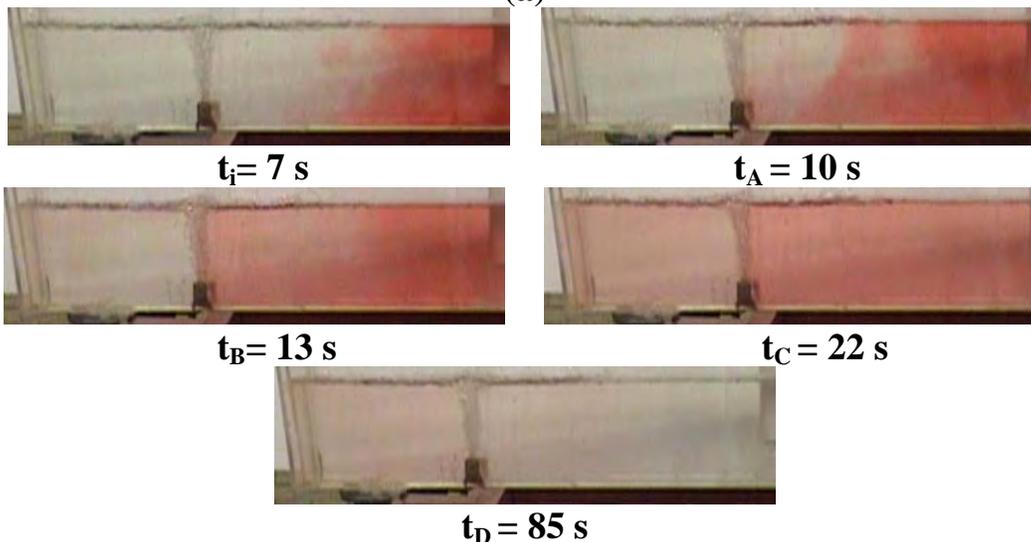
De las instantáneas de este experimento se nota que para  $t_i = 5$  s la velocidad del fluido es menor en el fondo del distribuidor. Cuando el frente del trazador en el fluido se acerca a la cortina de aire es forzado a disminuir su velocidad y a mezclarse con otras porciones del mismo que vienen más atrás pues la cortina actúa como una barrera que lo detiene y “compacta”. En seguida el fluido atraviesa la cortina y lo hace por la parte superior (Fig. 5.13 (b), para  $t_A = 13$  s). Al pasar por la cortina de aire el trazador es llevado hacia la zona de salida en donde una parte sale directamente por la buza y otra parte se

desplaza hacia las esquinas del distribuidor, como se ve en la foto para  $t_A = 16$  s. A causa de la agitación que provocan las burbujas de aire el colorante se distribuye en el extremo del distribuidor ocupando todos los espacios, como se ve en la instantánea para  $t_C = 30$  s. Finalmente, la foto para  $t_D = 51$  s muestra que el colorante se concentra en las esquinas del distribuidor, a la izquierda de la buza de salida.

Para un nivel de agua en el distribuidor mayor, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 5.14.



(a)

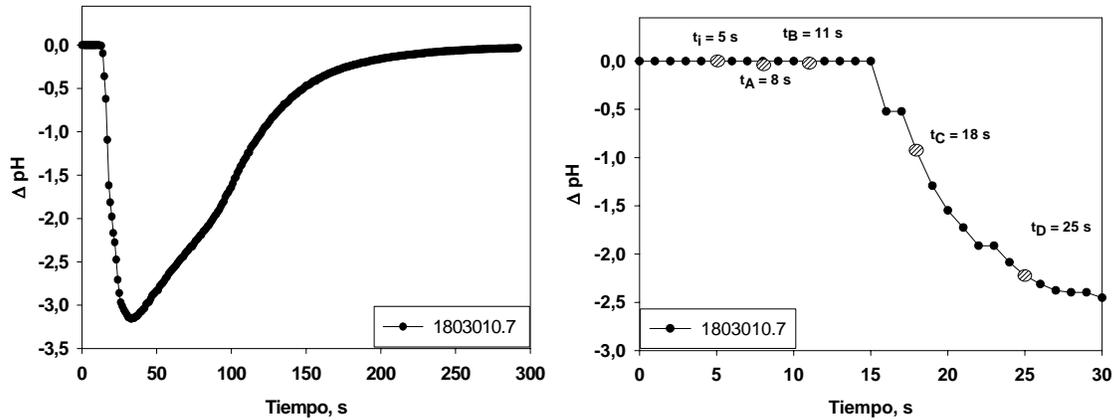


(b)

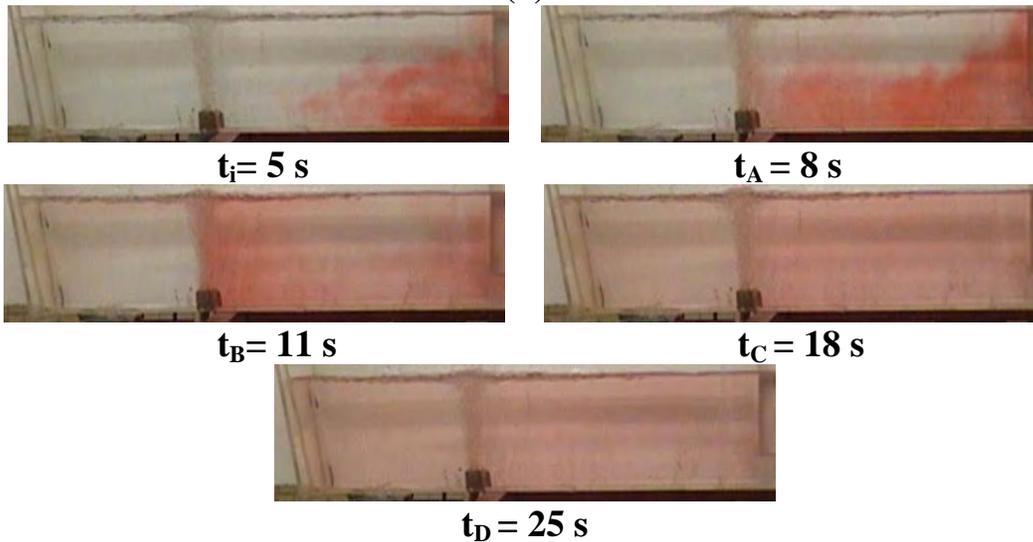
Figura 5.14- Experimento 1253010.7: (a) curvas  $\Delta pH$  vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor.

En este caso se tiene que cuando  $t_i = 7$  s el fluido se mueve más rápido en el fondo del distribuidor que en la superficie. Ese comportamiento continúa hasta que la porción de fluido que se mueve en el fondo llega a la base de la cortina de aire en donde es jalada por las corrientes en el agua que provocan las burbujas (que transfieren parte de su momentum al agua) y al mismo tiempo es detenida por la pared que forma la cortina (Figura 5.14 (b), para  $t_A = 10$  s). Para  $t_B = 13$  s el resto de fluido que va llegando se acumula a lo largo de la cortina para finalmente atravesarla por la parte superior. Las corrientes que genera la cortina provocan que el trazador se distribuya “homogéneamente” en todo el líquido presente entre la cortina y las paredes del extremo del distribuidor ( $t_C = 22$  s). Para  $t_D = 85$  s se aprecia que el trazador sigue distribuido en la misma zona aunque apenas es visiblemente perceptible - recordar que existe un umbral para el color.

Para el experimento con 18 cm de nivel de agua los resultados se reportan en la Figura 5.15.



(a)



(b)

**Figura 5.15- Experimento 1803010.7: (a) curvas  $\Delta pH$  vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor.**

En este caso el comportamiento del trazador tiene similitudes con el observado en los experimentos 1253010.7. A los 5 segundos después de la inyección el fluido se mueve más rápido en la parte baja del distribuidor y continua así hasta llegar a la base de la cortina de aire ( $t_A = 8$  s) en donde las paredes de la cortina lo detienen y al mismo tiempo las corrientes generadas por las burbujas lo arrastran hacia arriba. En la cresta de la cortina de burbujas el trazador queda atrapado y forzado por un lado a re-mezclarse y por otro a atravesar la cortina ( $t_B = 11$  s). Después de atravesar la cortina el colorante entra en una

trayectoria, al parecer circular, que lo hace distribuirse en todo el espacio comprendido entre la cortina de aire y las paredes del extremo del distribuidor ( $t_C = 18$  s, recordar el umbral de color). Desde ese instante y hasta el final del experimento es difícil distinguir algún patrón de flujo debido a que el colorante está muy diluido y distribuido en todo el líquido ( $t_D = 25$  s).

## Capítulo 6. Análisis de resultados

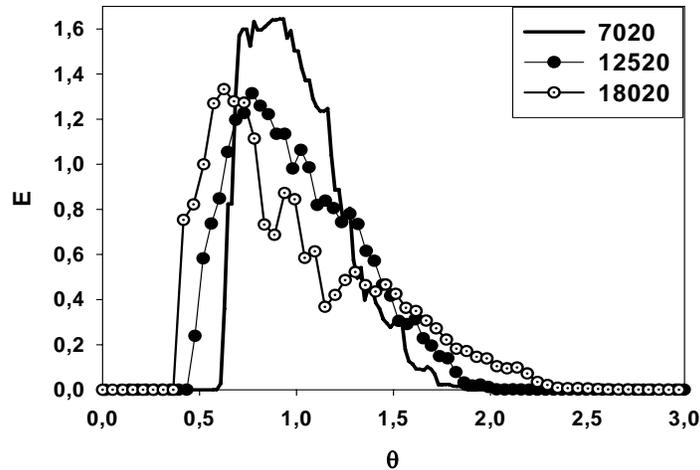
En este capítulo, a partir de los resultados experimentales mostrados en el Capítulo 5, se construyen las gráficas de funciones de distribución de edades con el fin de estimar las cantidades relativas de flujos de mezcla, pistón y volumen muerto producidos en cada experimento, basadas en la interpretación de las curvas de funciones de distribución de edad propuesta por Danckwerts [8]. Esas estimaciones se comparan con los resultados obtenidos usando el modelo combinado de Sahai y Emi [12] y con los de los experimentos de visualización mostrados en el capítulo anterior.

Como se discutió en la sección de Antecedentes, el análisis de la calidad del flujo en un modelo físico se realiza a partir de las funciones de distribución de edades de paquetes de fluido, dado que esta metodología normaliza a los resultados experimentales directos. Las funciones de distribución  $E(\theta)$  se calculan utilizando las (2.8) a (2.10) y (2.16).

### 6.1 Experimentos sin cortinas de aire (calidad de flujo)

#### 6.1.1 Efecto del nivel de agua

Las curvas de las funciones de distribución  $E(\theta)$  para los experimentos en que se utilizó un valor de  $Q_{\text{agua}} = 20$  L/min en la entrada y tres niveles de agua en el distribuidor son:



**Figura 6.1.- Funciones de distribución  $E(\theta)$  para tres niveles de agua en el distribuidor:  $H = 70, 125$  y  $180$  mm, y  $Q_{\text{agua}} = 20$  L/min en la entrada.**

En la gráfica anterior se aprecia que al aumentar la altura del fluido en el distribuidor las curvas se desplazan más hacia la izquierda y los valores máximos de  $E$  disminuyen, aspectos que advierten del aumento en el grado de mezcla del fluido en el reactor a medida que aumenta el nivel de agua dentro del mismo, ver Figura 2.4. Por otra parte, en las curvas 7020 y 12520 el área bajo la curva para valores de  $\theta > 2$  es nula y como consecuencia no hay volumen muerto. En cambio, en el experimento 18020 sí se detecta la presencia de volumen muerto.

Las curvas obtenidas para los experimentos en que se usaron 30 L/min de agua en la entrada y las mismas tres alturas de fluido en el distribuidor se muestran en la Figura 6.2. En esta gráfica se tiene nuevamente que al aumentar el nivel de agua en el distribuidor los valores correspondientes de  $E$  disminuyen y las curvas se mueven hacia la izquierda. Por otra parte, únicamente la curva 18030 muestra área bajo la curva para valores de  $\theta > 2$ , lo que indica que hay volumen muerto.

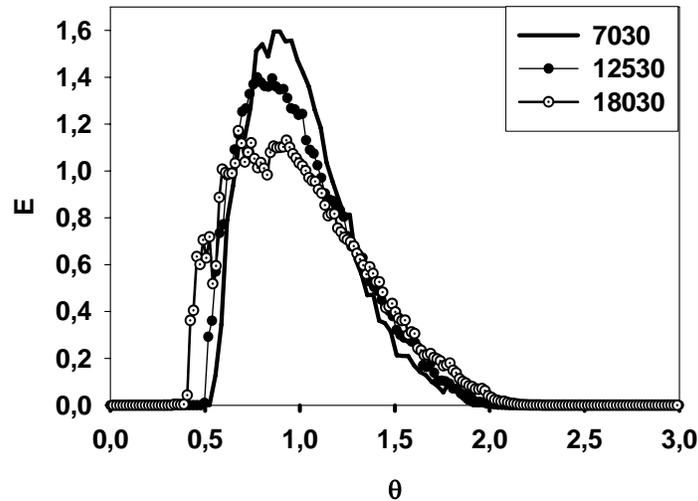


Figura 6.2.- Funciones de distribución  $E(\theta)$  para tres niveles de agua en el distribuidor:  $H = 70, 125$  y  $180$  mm y  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min en la entrada.

Por otra parte, las funciones de distribución  $I(\theta)$  se calculan utilizando las ecuaciones (2.10), (2.12) y (2.17). Las curvas  $I(\theta)$  vs.  $\theta$  correspondientes a cada uno de los flujos de agua en la entrada (20 y 30 L/min) se muestran en las Figuras 6.3 (a) y (b), respectivamente.

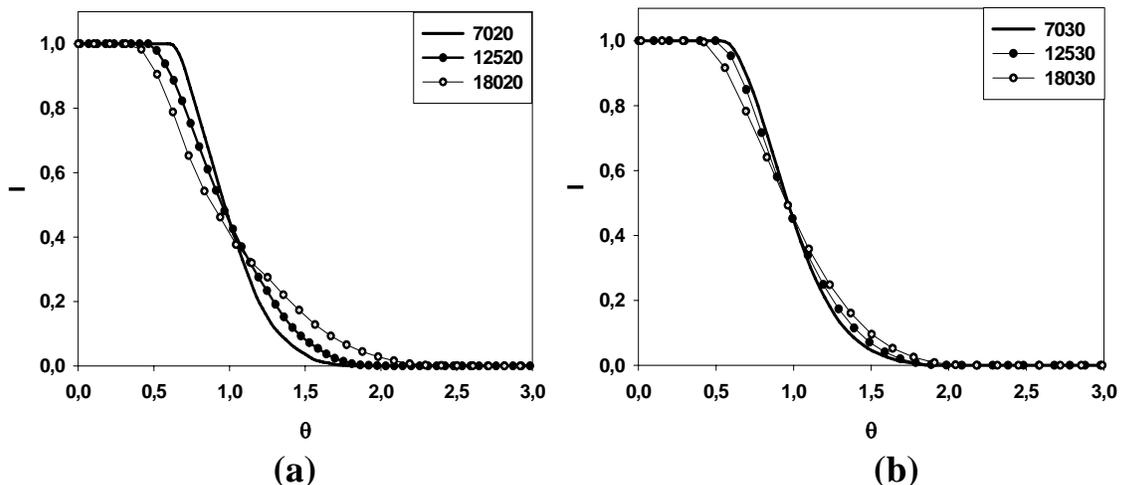
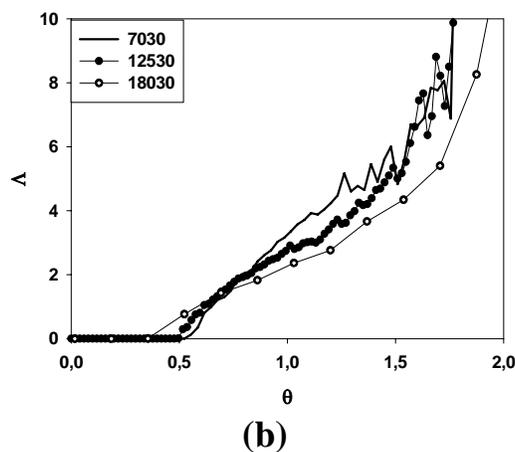
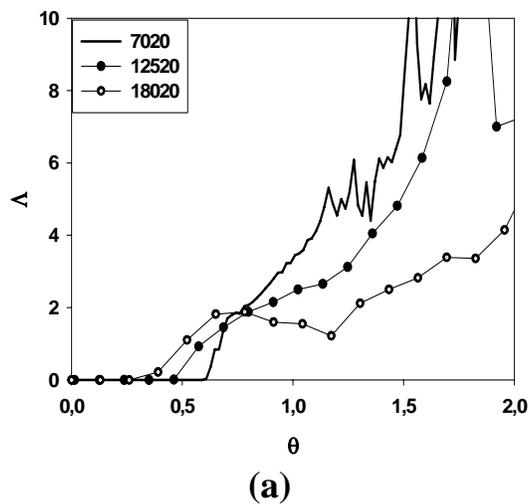


Figura 6.3.- Funciones de distribución  $I(\theta)$  para tres niveles de agua en distribuidor ( $H = 70, 125$  y  $180$  mm) y dos flujos de agua en la entrada: (a)  $Q_{\text{agua}} = 20$  y (b)  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min.

De ambas gráficas en la Figura 6.3 (a) y (b) se aprecia que cuando  $\theta = 1$  el valor de  $I(\theta)$  correspondiente para cada curva toma un valor aproximado de 0.4 y ninguna de ellas

muestra colas excesivamente largas; además se nota que la parte intermedia de las curvas muestra una pendiente menor a medida que aumenta la altura, lo que indica un aumento en el grado de mezcla dentro del reactor a medida que aumenta el nivel de agua dentro del mismo, ver Figura 2.4. Por otra parte, en ninguna de las gráficas se nota un descenso rápido de los valores de  $I(\theta)$  al inicio de las curvas, lo que indicaría la presencia de volumen en cortocircuito.

Las funciones de distribución  $\Lambda(\theta)$  se calcularon con las ecuaciones (2.10) y (2.14) y las curvas correspondientes para cada valor de  $Q_{\text{agua}}$  se muestran en la Figura 6.4.



**Figura 6.4.- Funciones de distribución  $\Lambda(\theta)$  para tres niveles de agua en el distribuidor ( $H=70, 125$  y  $180$  mm) y dos flujos de agua en la entrada: (a)  $Q_{\text{agua}}=20$  y (b)  $Q_{\text{agua}}=30$  L/min.**

En la gráfica de la Figura 6.4 (a) se nota que al disminuir el nivel de agua en el distribuidor las curvas se acercan más rápido a valores de  $I(\theta)$  que tienden a infinito cuando  $\theta=1$ . En este caso mientras menor sea la pendiente de la curva mayor será el grado de mezcla del fluido en el reactor, ver Figura 2.4. Además, la curva del experimento 18020 muestra una parte decreciente en la proximidad de  $\theta \geq 1$ , lo que indica la existencia de volumen muerto, ver Figura 2.6. En la gráfica (b) se aprecia la misma tendencia, sin embargo ninguna curva indica la presencia de volumen muerto.

Para calcular la función de distribución  $F(\theta)$  se utilizan las ecuaciones (2.17) y (2.24). A partir de la gráfica  $F(\theta)$  vs.  $\theta$  es posible calcular la fracción de flujo pistón para cada experimento utilizando el valor de  $\theta_{min}$  cuando  $F(\theta) = 0.01$  [5]. Como ejemplo se toma el experimento 12530; la Figura 6.5 muestra la curva correspondiente. Para este caso se tiene que  $\theta_{min} = 0.54$  cuando  $F(\theta) = 0.01$ , lo que se traduce en 54 % de flujo pistón. El procedimiento seguido para el resto de los casos fue idéntico.

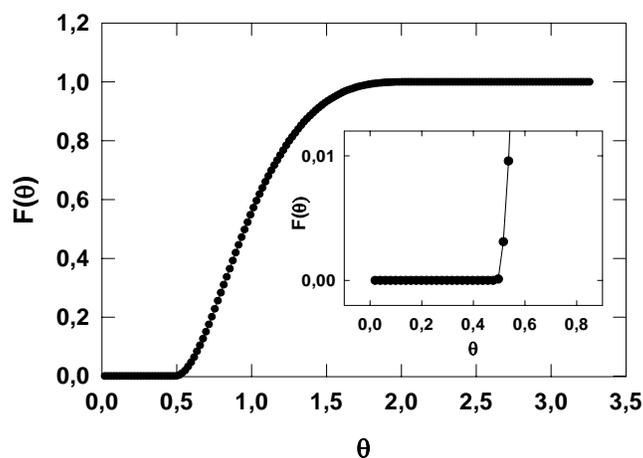


Figura 6.5.- Función de distribución  $F(\theta)$  para el experimento 12530.

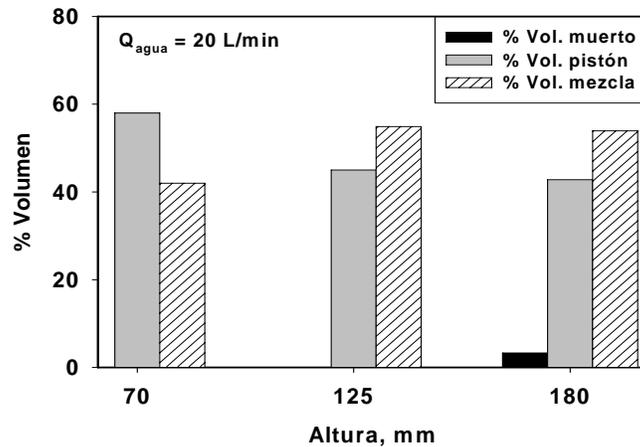
A partir de las curvas adimensionales de distribución de edad (curvas  $C$ ) y las ecuaciones correspondientes al modelo combinado fue posible calcular los porcentajes de: 1) volumen muerto  $\%(V_d/V)$ ; 2) volumen de mezcla completa  $\%(V_m/V)$  y 3) volumen de flujo pistón  $\%(V_p/V)$ , que permiten caracterizar a la calidad del flujo. En particular, se utilizó el método de  $\theta_{min}$  ( $V_p/V$ ) propuesto por Sahai y Emi [13] utilizando las ecuaciones (2.26) a (2.35).

En la Tabla 6.1 se muestran los porcentajes de flujo pistón, de mezcla completa y de volumen muerto obtenidos de esta manera para los experimentos en que no se usaron cortinas de aire.

**Tabla 6.1.- Porcentajes de volumen muerto, de mezcla perfecta y de flujo pistón para  $Q_{\text{agua}}=20$  y 30 L/min de agua en la entrada y tres niveles de agua en el distribuidor.**

Experimento	$\%(V_d/V)$	$\%(V_m/V)$	$\%(V_p/V)$
7020	0	42	58
12520	0.1	54.9	45
18020	3.3	53.9	42.8
7030	0	47.6	52.4
12530	0	50	50
18030	0.5	61.7	37.8

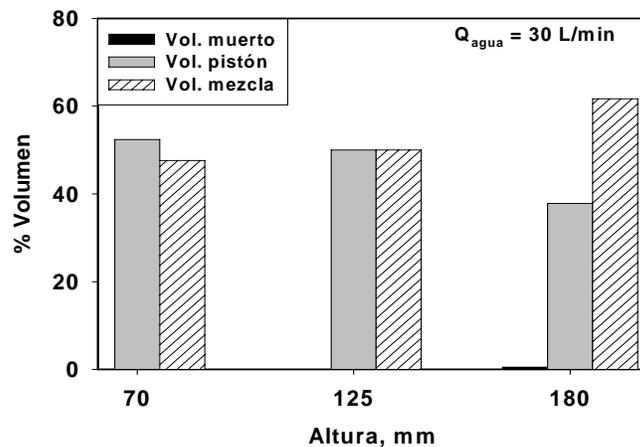
Las gráficas correspondientes a los datos tabulados, para cada valor de flujo de agua, se muestran en las Figuras 6.6 y 6.7.



**Figura 6.6.- Porcentajes de los tipos de flujo presentes en el distribuidor.  $Q_{\text{agua}} = 20 \text{ L/min}$  y tres niveles de agua, sin cortina de aire.**

En la Figura 6.6 se observa la presencia de volumen muerto cuando el nivel de agua es de 180 mm. Asimismo, el porcentaje de flujo pistón disminuye a medida que aumenta la altura mientras que la cantidad de flujo de mezcla aumenta cuando es mayor el nivel de agua en el distribuidor.

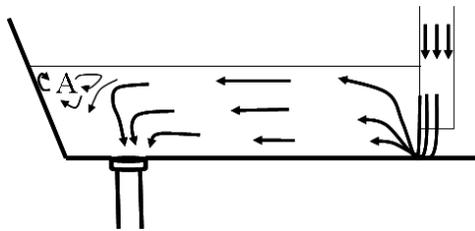
Para el flujo de 30 L/min la gráfica correspondiente se muestra en la Figura 6.7. En ella se aprecia un porcentaje muy pequeño de volumen muerto para la altura máxima. El porcentaje de flujo de mezcla aumenta a medida que aumenta el nivel de agua en distribuidor, mientras que para el porcentaje de flujo pistón sucede lo contrario.



**Figura 6.7.- Porcentajes de los tipos de flujo presentes en el distribuidor.  $Q_{\text{agua}} = 30 \text{ L/min}$  y tres niveles de agua, sin cortina de aire.**

De las gráficas anteriores se puede notar que las estimaciones hechas a partir de las gráficas de función de edades coinciden con los resultados numéricos obtenidos mediante el modelo combinado. También se registran valores menores de volumen muerto para la condición en que  $Q_{\text{agua}} = 30 \text{ L/min}$ .

A lo anterior se puede agregar un esquema simplificado del comportamiento del fluido en el distribuidor. De las filmaciones se observó que independientemente del nivel de agua y del valor del  $Q_{\text{agua}}$  aplicado el patrón de flujo para este grupo de experimentos es el que se muestra en la Figura 6.8.:

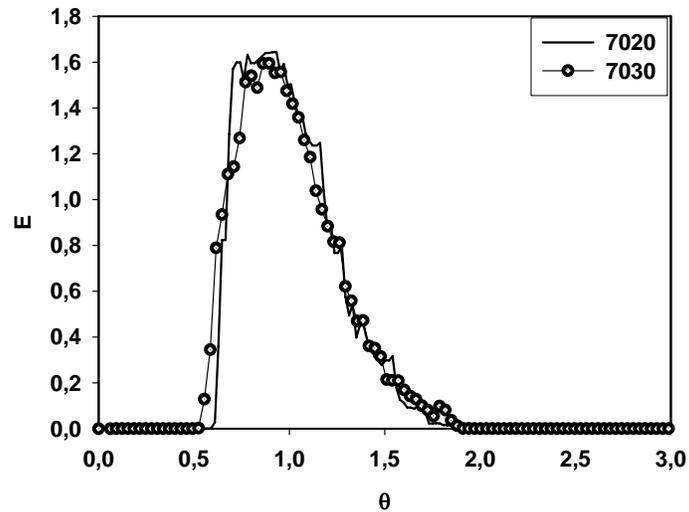


**Figura 6.8.- Representación esquemática del patrón de flujo observado para los experimentos sin cortina de aire y con flujos de agua de 20 o 30 L/min.**

Al entrar al distribuidor el fluido impacta el fondo del mismo y se proyecta en todas las direcciones llevando mayor velocidad en la zona cercana a la superficie abierta. Sin embargo el perfil de velocidades del frente del fluido va cambiando, de modo que al aproximarse a la salida la porción de fluido que va en el fondo se desplaza ahora con mayor velocidad que la que se mueve cerca de la superficie. En la salida, la mayor parte del trazador desaparece pero un pequeño volumen se desplaza a la zona marcada con “A”, en donde su movimiento es más lento. Además, para  $H = 70 \text{ mm}$  se detectó la formación de vórtices en la salida.

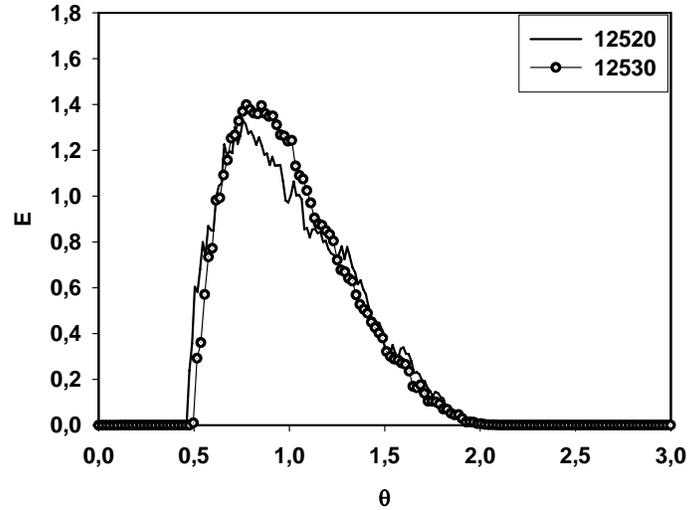
### 6.1.2 Efecto del flujo de agua en la entrada

En esta sección se muestran los resultados de los experimentos en que se variaron los flujos de entrada de agua en el distribuidor manteniendo el nivel de agua constante. Las gráficas para las funciones de edad  $E$  vs.  $\theta$  se muestran en las figuras 6.9 a 6.11.



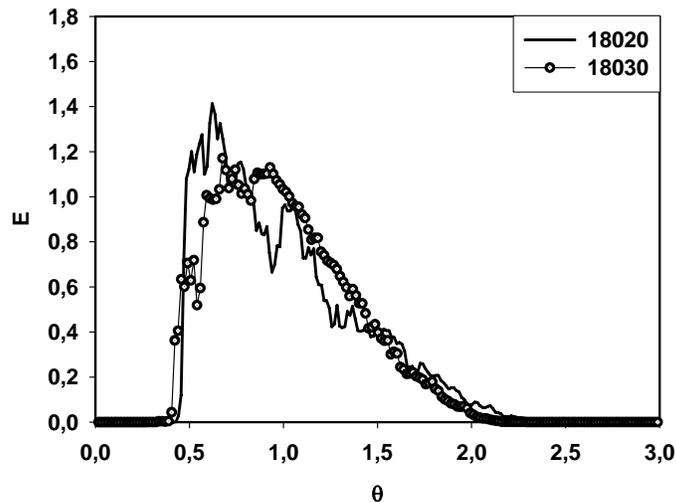
**Figura 6.9.- Funciones de distribución  $E(\theta)$ .  $H=70$  mm de agua en el distribuidor, con  $Q_{\text{agua}}=20$  L/min y  $Q_{\text{agua}}=30$  L/min en la entrada.**

De la Figura 6.9 se nota que las dos curvas muestran un comportamiento similar; ninguna presenta área bajo la curva para valores de  $\theta \geq 2$ , lo que indica la ausencia de volumen muerto. Las curvas muestran algo de simetría y los picos (con  $E(\theta) \approx 1.6$ ) de las mismas casi corresponden con  $\theta = 1$ , lo que sugiere que el grado de mezcla en el reactor es relativamente pequeño y casi igual en ambos experimentos, bajo las condiciones de operación dadas.



**Figura 6.10.- Funciones de distribución  $E(\theta)$ .  $H=125$  mm de agua en el distribuidor, con  $Q_{\text{agua}}=20$  L/min y  $Q_{\text{agua}}=30$  L/min en la entrada.**

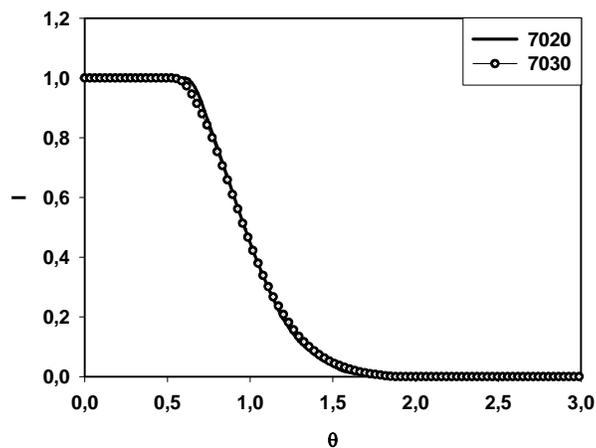
Para el experimento en que  $H=125$  mm las curvas no indican la presencia de volumen muerto - no hay área bajo la curva para valores de  $\theta \geq 2$ . En este caso los picos de las curvas están ligeramente desplazadas hacia la izquierda respecto al valor de  $\theta=1$ . Los picos de las curvas muestran valores  $E(\theta) \approx 1.3$  y son menores que en los del experimento para  $H = 70$  mm de la Figura 6.9, lo que indica que el grado de mezcla aumentó para éste par de experimentos.



**Figura 6.11.- Funciones de distribución  $E(\theta)$ .  $H=180$  mm de agua en el distribuidor, con  $Q_{\text{agua}}=20$  L/min y  $Q_{\text{agua}}=30$  L/min en la entrada.**

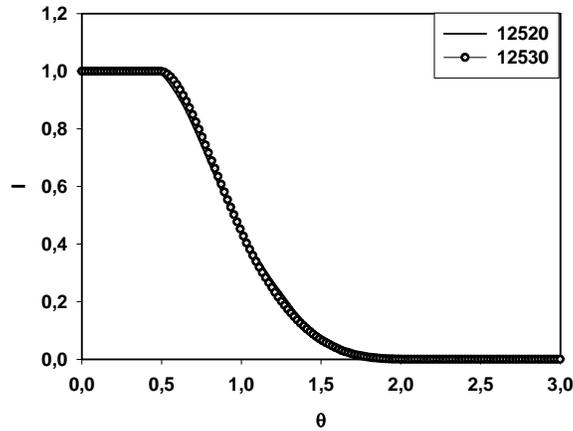
En la Figura 6.11 se nota que la curva 18020 muestra un comportamiento fluctuante, además la cola de esta curva indica la presencia de volumen muerto, pues registra valores  $\theta > 2$ . La cola de la curva 18030 no muestra éste último efecto. La asimetría de ambas curvas en la Figura 6.11 indica que el fluido dentro del reactor se aleja del comportamiento en que el grado de mezcla es relativamente pequeño. Los picos de las curvas tienen valores  $E(\theta)$  aproximados de 1.2 sugiriendo que el grado de mezcla para éste caso es mayor que en los experimentos anteriores en los que el nivel de agua en el distribuidor fue de 125 y 70 mm.

Las curvas correspondientes para la función de edad  $I(\theta)$  se grafican en las figuras 6.12 a 6.14.



**Figura 6.12.- Funciones de distribución  $I(\theta)$ .  $H = 70$  mm de agua en el distribuidor con  $Q_{\text{agua}} = 20$  L/min y  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min en la entrada.**

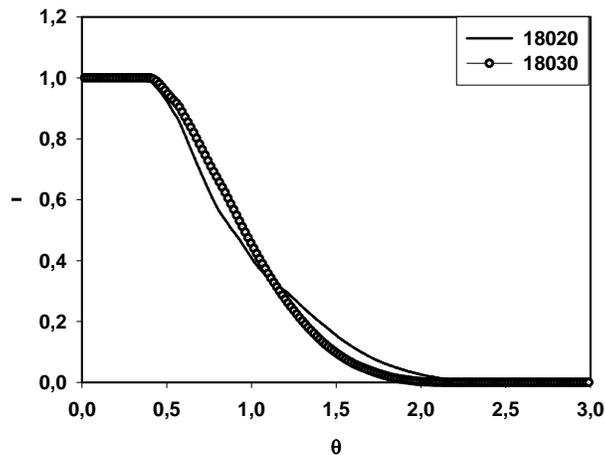
De la Figura 6.12 se nota que las curvas para ambos experimentos son casi idénticas. No hay diferencia en la inclinación de sus pendientes. Los valores de  $I(\theta)$  cuando  $\theta = 1$  coinciden en aproximadamente  $I(\theta) = 0,4$ , lo que indica que en los dos casos el grado de mezcla del fluido es pequeño. Además no se aprecia un descenso rápido de los valores  $I(\theta)$  al inicio de las curvas, lo que indicaría la presencia de volumen en cortocircuito.



**Figura 6.13.- Funciones de distribución  $I(\theta)$ .  $H = 125$  mm de agua en el distribuidor con  $Q_{\text{agua}} = 20$  L/min y  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min en la entrada.**

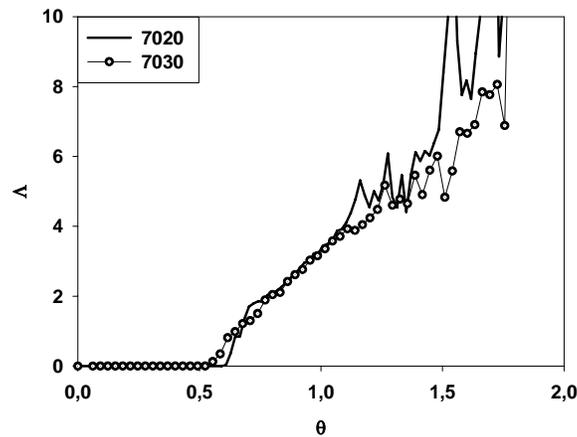
Las curvas de la Figura 6.13 tampoco muestran diferencias notables y no hay descenso rápido de los valores  $I(\theta)$  al inicio de las curvas, por lo que no hay volumen de fluido en cortocircuito. Sin embargo, cuando  $\theta = 1$  los valores  $I(\theta)$  de ambas curvas coinciden siendo ligeramente menores a 0.4, indicando que el grado de mezcla es relativamente pequeño.

De la Figura 6.14 se aprecia nuevamente que los valores  $I(\theta)$  de ambas curvas coinciden en ser de casi 0.4 y no hay descenso rápido de los valores  $I(\theta)$  al inicio de las mismas.



**Figura 6.14.- Funciones de distribución  $I(\theta)$ .  $H = 180$  mm de agua en el distribuidor con  $Q_{\text{agua}} = 20$  L/min y  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min en la entrada.**

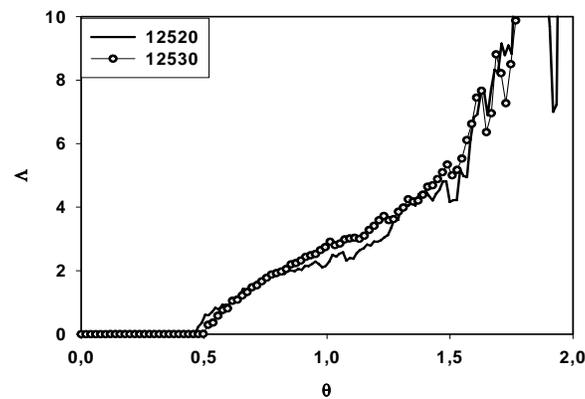
Las gráficas para la función  $\Lambda(\theta)$  se muestran en las Figuras 6.15 a 6.17.



**Figura 6.15.- Funciones de distribución  $\Lambda(\theta)$ .  $H=70$  mm de agua en distribuidor para dos flujos de agua en la entrada:  $Q_{\text{agua}}=20$  y  $Q_{\text{agua}}=30$  L/min.**

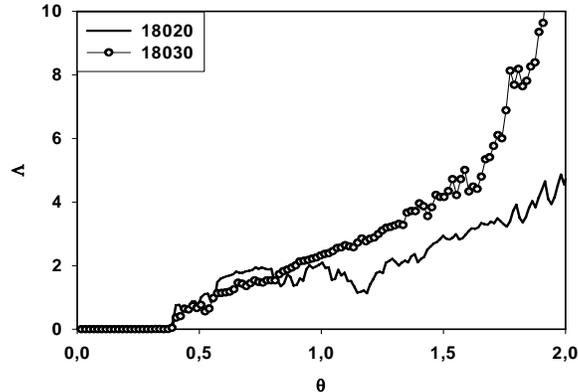
En el par de curvas de la Figura 6.15 no se nota una función creciente  $\Lambda(\theta)$  para tiempos bajos, lo que indicaría la presencia de fluido en cortocircuito. En ambos casos los valores  $\Lambda(\theta)$  tienden rápidamente a  $+\infty$  en valores cercanos a  $\theta=1$  sugiriendo que se trata de un fluido en el que el grado de mezcla es pequeño, ver Figura 2.4. Tampoco se observa un descenso en los valores de  $\Lambda(\theta)$  para valores mayores pero cercanos a  $\theta=1$ , lo que es característico de la presencia de volumen muerto.

Para los experimentos en que el nivel de agua es de 125 mm la gráfica correspondiente se reporta en la Figura 6.16.



**Figura 6.16.- Funciones de distribución  $\Lambda(\theta)$  para  $H=125$  mm de agua en distribuidor, con dos flujos de agua en la entrada:  $Q_{\text{agua}}=20$  y  $Q_{\text{agua}}=30$  L/min.**

En donde el comportamiento de las curvas 12520 y 12530 es similar al observado en la Figura 6.15. No hay cambios en las curvas que indiquen la presencia de volumen muerto o en cortocircuito.



**Figura 6.17.- Funciones de distribución  $A(\theta)$ .  $H=180$  mm de agua en distribuidor para dos flujos de agua en la entrada:  $Q_{\text{agua}}=20$  y  $Q_{\text{agua}}=30$  L/min.**

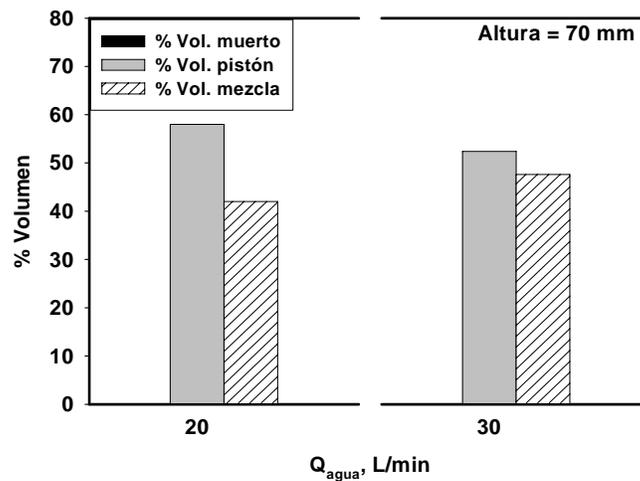
En la figura 6.17 los valores  $A(\theta)$  de la curva 18030 tienden más rápido a  $+\infty$  que los de la curva 18020. En ninguna de las curvas se nota una función creciente  $A(\theta)$  para tiempos bajos, indicando que no hay volumen en cortocircuito. Para valores mayores pero cercanos a  $\theta=1$  hay un ligero descenso para los valores de  $A(\theta)$  en la curva 18020 lo que sugiere la presencia de volumen muerto.

De nuevo, la información de las curvas adimensionales de funciones de edad se puede incorporar al modelo combinado de Sahai y Emi para caracterizar a la calidad del flujo. Los resultados ya se habían reportado previamente (ver Tabla 6.1) pero ahora se muestran poniendo atención en el flujo de agua en la entrada del distribuidor como variable independiente (Tabla 6.2).

**Tabla 6.2.- Porcentajes de volumen muerto, de mezcla perfecta y de flujo pistón para  $Q_{\text{agua}}=20$  y 30 L/min de agua en la entrada y tres niveles de agua en el distribuidor.**

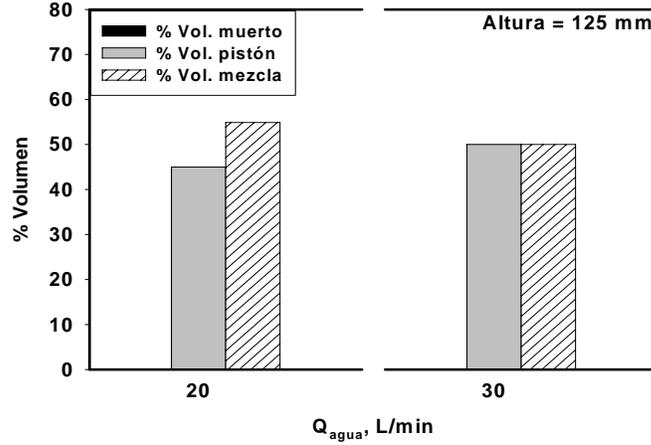
Experimento	$\%(V_d/V)$	$\%(V_m/V)$	$\%(V_p/V)$
7020	0	42	58
7030	0	47.6	52.4
12520	0.1	54.9	45
12530	0	50	50
18020	3.3	53.9	42.8
18030	0.5	61.7	37.8

Las gráficas de barras correspondientes a los datos tabulados se muestran en las Figuras 6.18 a 6.20.



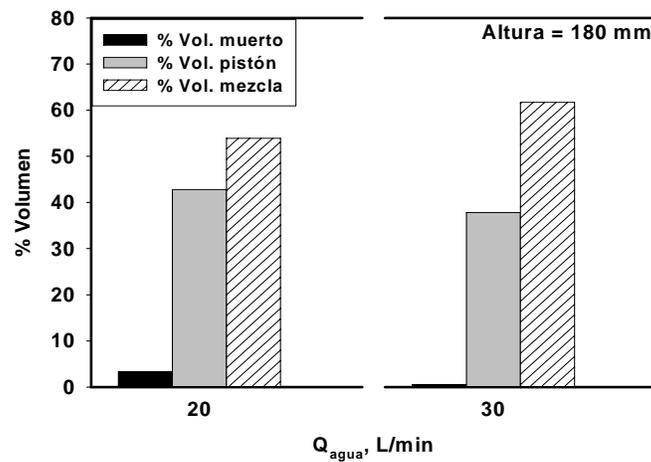
**Figura 6.18.- Porcentajes de los tipos de flujo presentes en el distribuidor para  $H = 70$  mm y dos flujos de agua en la entrada  $Q_{\text{agua}} = 20$  L/min y  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min, sin cortinas de aire.**

Para los experimentos en que el nivel de agua en el distribuidor fue de  $H = 70$  mm no se observa la presencia de volumen muerto, independientemente del flujo de agua aplicado. El porcentaje de flujo pistón es ligeramente mayor para el experimento en el que se usó  $Q_{\text{agua}} = 20$  L/min. En cambio el volumen de mezcla fue ligeramente mayor en el experimento 7030, es decir para  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min.



**Figura 6.19.-** Porcentajes de los tipos de flujo presentes en el distribuidor para  $H = 125$  mm y dos flujos de agua en la entrada:  $Q_{\text{agua}} = 20$  L/min y  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min, sin cortinas de aire.

Para el caso en  $H=125$  mm los porcentajes de volumen de mezcla y volumen pistón son iguales cuando se utilizó un flujo  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min y estos valores son ligeramente mayores a los correspondientes para el experimento 12520. En ninguno de los casos hay presencia de volumen muerto.



**Figura 6.20.-** Porcentajes de los tipos de flujo presentes en el distribuidor.  $H = 180$  mm y dos flujos de agua en la entrada  $Q_{\text{agua}} = 20$  L/min y  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min, sin cortinas de aire.

De la Figura 6.20, cuando  $H=180$  mm, se nota la presencia de volumen muerto en ambos experimentos aunque es mucho mayor en el experimento 18020. El porcentaje de volumen de mezcla es mayor en el experimento en que se aplicó un flujo  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min.

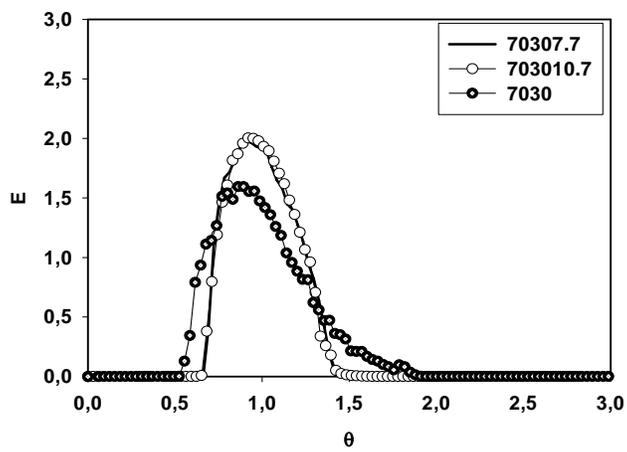
De esta subsección se puede concluir que independientemente del valor de  $Q_{\text{agua}}$  aplicado no se encuentran diferencias notables respecto a los porcentajes de volúmenes de mezcla y pistón, pues como se puede ver en la Tabla 6.2 los valores son cercanos entre sí para cada par de experimentos con diferente valor de  $Q_{\text{agua}}$  y una altura dada. En este caso coinciden también las estimaciones hechas a partir de las gráficas de función de edades con los resultados obtenidos mediante el modelo combinado en lo que se refiere a la presencia de volumen muerto. En cuanto a las cantidades relativas de flujo de mezcla y pistón presentes es difícil hacer una estimación a partir de las gráficas debido a la similitud de las curvas cuando el nivel de agua es de 70 y 125 mm y a la fluctuación de las curvas en los casos en que el nivel de agua es de 180 mm.

Recuérdese que en la Figura 6.8 de la subsección 6.1.1 se mostró un esquema simplificado del comportamiento del fluido. Ese comportamiento no se ve afectado de manera considerable si se aplican 20 o 30 L/min de agua al sistema.

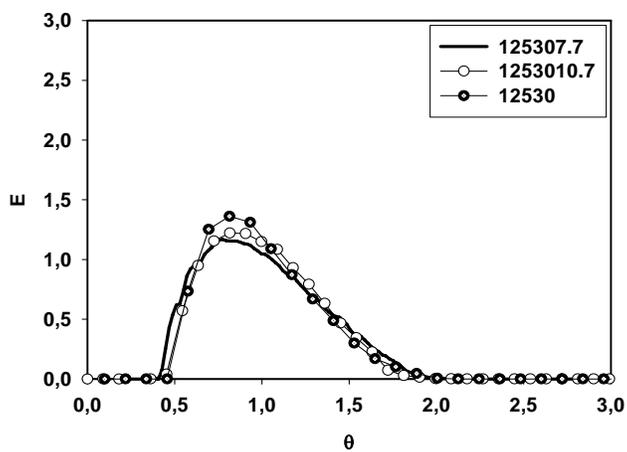
## **6.2 Experimentos con cortinas de aire (calidad de flujo)**

### **6.2.1 Efecto de la presencia de la cortina de aire**

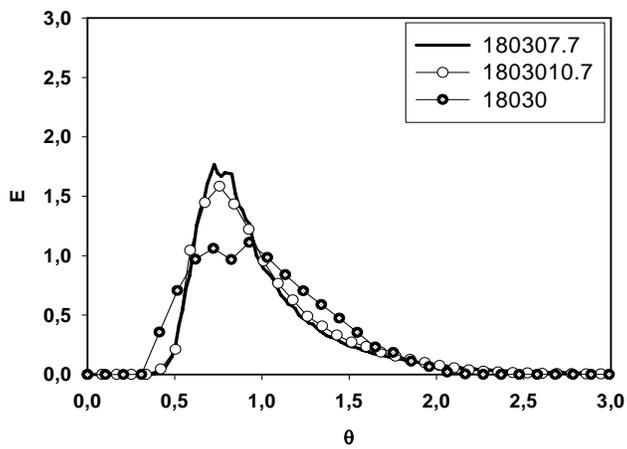
En esta sección se comparan las curvas de distribución de edades obtenidas para los experimentos en que se aplican cortinas de aire (con dos flujos de aire  $Q_{\text{aire}} = 7.7$  , 10.7 L/min) y aquellos para los que no se usaron cortinas, manteniendo el flujo de agua de entrada constante (30 L/min). Las curvas  $E(\theta)$  vs.  $\theta$  para las tres niveles de agua experimentados se muestran en la Figura 6.21.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.21.- Funciones de distribución  $E(\theta)$  para  $Q_{\text{aire}} = 0, 7.7$  y  $10.7$  L/min, (a)  $H=70$ mm, (b)  $125$  mm y (c)  $180$  mm. En todos los casos el flujo de entrada de agua fue de  $30$  L/min.

Las curvas de la Figura 6.21 (a) corresponden a un nivel de agua en el distribuidor de 70 mm. Se aprecia que hay diferencias entre las curvas del experimento sin cortinas de aire y las correspondientes a los experimentos con cortinas de aires; entre las curvas para cortinas de aire no hay diferencias notables, la variación en el valor del flujo de aire aplicado no tiene un efecto considerable sobre el comportamiento del fluido en el reactor. En particular, las curvas obtenidas de los experimentos con cortinas de aire son casi simétricas y los valores  $E(\theta)$  máximos están muy próximos a los valores de  $\theta = 1$ , no muestran colas largas ni área bajo la curva para valores de  $\theta > 2$ , por lo tanto no hay volumen muerto. Los valores de  $E(\theta)$  máximos de estas curvas son mayores ( $\approx 2$ ) que el correspondiente para el experimento sin aire ( $\approx 1.5$ ), lo que sugiere que hubo más mezcla en éste último.

De la Figura 6.21 (b) se nota que la curva 12530 tiene un valor de  $E(\theta)$  máximo mayor que las curvas 1253010.7 y 125307.7, lo que significa que en el primer caso hay menos volumen de mezcla. En ninguna de las curvas se tiene volumen muerto pues el área bajo la curva para valores de  $\theta > 2$  es nulo. En este caso no se aprecia una diferencia significativa en la forma de las curvas  $E(\theta)$  al aplicar cortinas de aire o no aplicarlas.

Cuando  $H = 180$ , Figura 6.21 (c), se nota menos simetría alrededor de  $\theta = 1$  y además las colas son largas. En este caso sí se detecta volumen muerto que es casi igual en las dos curvas de los experimentos con cortinas de aire y más pequeño para 18030. En este caso los máximos de las curvas que representan los experimentos con aire son mayores ( $\approx 1.5$ ) que el correspondiente para el experimento sin aire ( $\approx 1$ ), lo que quiere decir que en el caso 18030 el grado de mezcla es mayor.

Dado que para estos experimentos las curvas de  $E$  vs.  $\theta$  dan la información más relevante respecto al tipo de flujo presente y no tienen fluctuaciones, ya no se considera necesario construir el resto de curvas para las funciones  $I(\theta)$  y  $A(\theta)$ . Los valores de volumen muerto, pistón y mezcla obtenidos a partir del modelo combinado se muestran en la Tabla 6.3.

**Tabla 6.3.- Porcentajes de volumen muerto, de mezcla perfecta y de flujo pistón para  $Q_{\text{aire}} = 7.7$  y  $10.7$  L/min para tres niveles de agua en el distribuidor y  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min.**

<b>Experimento</b>	<b>%(<math>V_d/V</math>)</b>	<b>%(<math>V_m/V</math>)</b>	<b>%(<math>V_p/V</math>)</b>
<b>7030</b>	0	47.6	52.4
<b>70307.7</b>	0	33.7	66.3
<b>703010.7</b>	0	34.7	65.3
<b>12530</b>	0	50	50
<b>125307.7</b>	0.1	59.2	40.7
<b>1253010.7</b>	0.1	56.9	43
<b>18030</b>	0.5	61.7	37.8
<b>180307.7</b>	7.9	57.8	34.3
<b>1803010.7</b>	5.2	54.8	40

Las gráficas que comparan los resultados de calidad de flujo obtenidos para estos experimentos se presentan en la Figura 6.22.

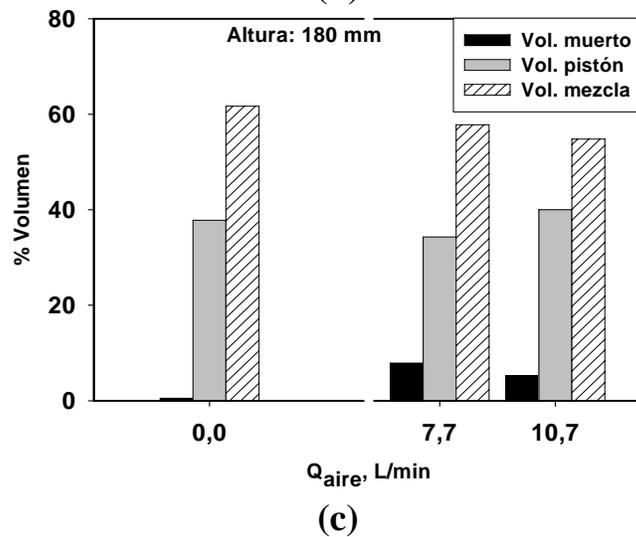
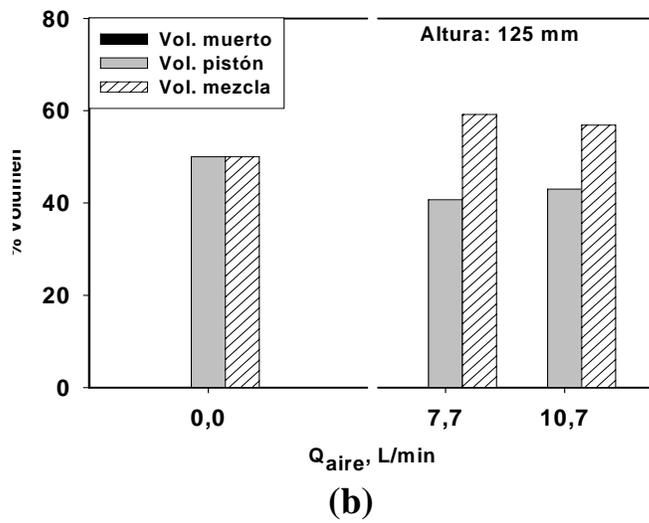
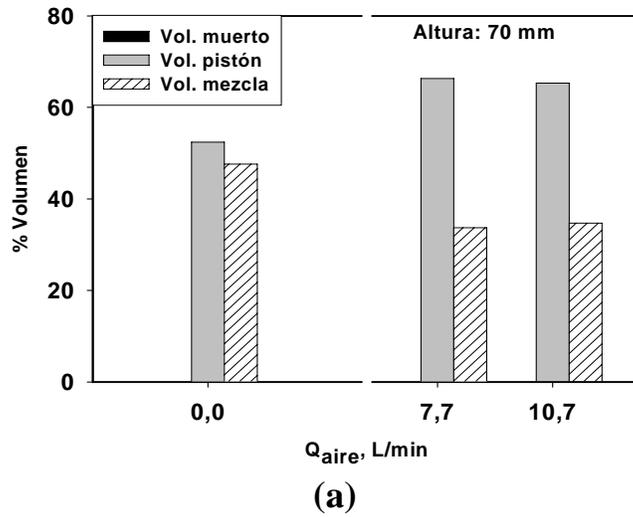


Figura 6.22.- Cantidades relativas de volumen muerto, mezcla completa y pistón presentes en el distribuidor con  $Q_{\text{aire}} = 0, 7.7$  y  $10.7$  L/min,  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min, para: (a)  $H=70\text{mm}$ , (b)  $H=125\text{mm}$  y (c)  $H=180\text{mm}$ .

Las barras del inciso (a) de la Figura 6.22 muestran que el uso de cortinas de aire provoca un aumento en los valores de flujo pistón y una disminución del porcentaje de fluido que pasa como volumen de mezcla dentro del reactor cuando el nivel de agua es de 70 mm. En ninguno de estos experimentos se detecta volumen muerto.

Por otra parte, el inciso (b) muestra el efecto inverso: cuando el nivel de agua es de 125 mm, pues el uso de cortinas hace que los valores de flujo pistón sean menores que el correspondiente para el experimento en que no se usó cortina de aire. Tampoco se aprecia volumen muerto.

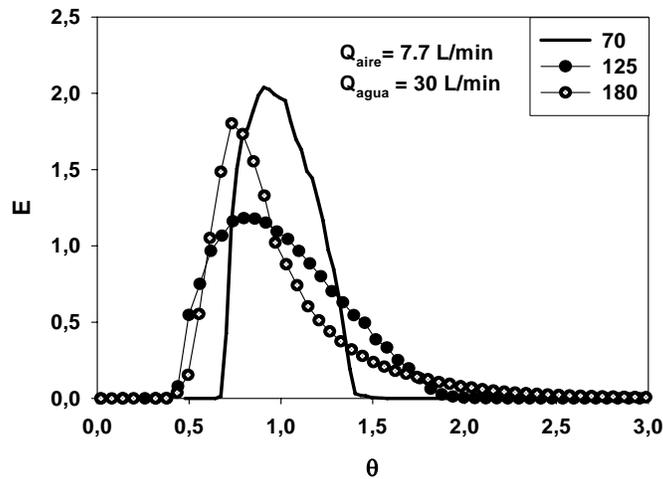
Por último en el inciso (c) es evidente la presencia de volumen muerto en los experimentos en que se usaron cortinas de aire y es ligeramente mayor para el caso en que el flujo de aire aplicado fue de 7.7 L/min. Para el experimento en que no se usaron cortinas de aire el volumen muerto es casi cero.

### 6.2.2. Efecto del nivel de agua

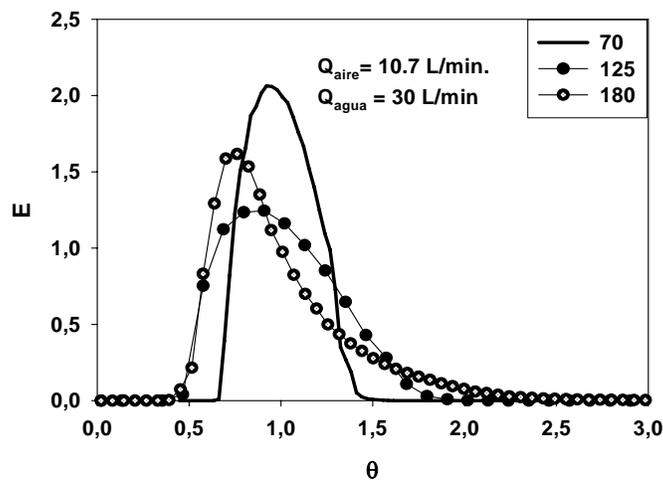
Las curvas  $E(\theta)$  vs.  $\theta$  para tres niveles de agua y dos flujos de aire se muestran en la Figura 6.23. A partir de las características de la curva  $E$  vs.  $\theta$  se puede hacer un estimado del tipo de flujo predominante en un experimento dado [11]. Una curva simétrica con respecto al valor de  $\theta = 1$  advierte que se trata de un tanque en el que el grado de mezcla es pequeño; para este caso el aumento en el valor máximo  $E(\theta)$  de la curva indica que el grado de mezcla en el tanque se va haciendo más pequeño para dar lugar a un flujo de tipo pistón. Por otra parte, una curva asimétrica y con colas largas advierten de la presencia de volumen muerto.

De la Figura 6.23 (a) se nota la siguiente tendencia:

$$E_{max(70307.7)} > E_{max(180307.7)} > E_{max(125307.7)}$$



(a)



(b)

**Figura 6.23.- Funciones de distribución  $E(\theta)$  para tres niveles de agua en el distribuidor ( $H=70, 125$  y  $180$  mm), flujo de entrada de agua de  $30$  L/min y dos flujos de aire: (a)  $Q_{\text{aire}}=7.7$  y (b)  $Q_{\text{aire}}=10.7$  L/min.**

por lo tanto se puede esperar que los porcentajes de volumen de mezcla tengan también la siguiente tendencia:

$$Vm_{(70307.7)} < Vm_{(180307.7)} < Vm_{(125307.7)}$$

Además, la curva 180307.7 muestra cola larga con porción de área bajo la curva para valores de  $\theta > 2$  indicando la presencia de volumen muerto.

Para la curva 125307.7  $E(\theta)$  es prácticamente cero para valores de  $\theta > 2$  y para la curva 70307.7  $E(\theta)$  se vuelve cero mucho antes de  $\theta = 2$ .

Del mismo modo para las curvas de la Figura 6.23 (b) se tiene la tendencia:

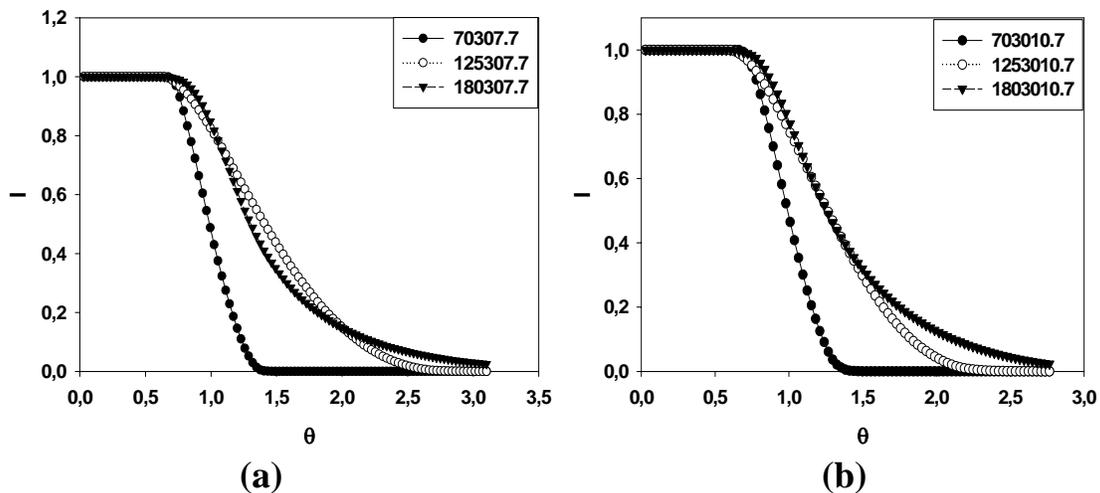
$$E_{max(703010.7)} > E_{max(1803010.7)} > E_{max(1253010.7)}$$

y por lo tanto los valores de volumen de mezcla esperados tenderán a :

$$Vm_{(703010.7)} < Vm_{(1803010.7)} < Vm_{(1253010.7)}$$

Se nota también que cuando el nivel de agua es de 180 mm la curva 1803010.7 muestra presencia de volumen muerto como lo sugiere la longitud de la cola.

Las curvas  $I(\theta)$  vs.  $\theta$  correspondientes a cada flujo de aire en la entrada (7.7 y 10.7 L/min) se muestran para cada combinación de altura de fluido y de flujo en la entrada del modelo en las Figura 6.24 (a) y (b), respectivamente.



**Figura 6.24.- Funciones de distribución  $I(\theta)$  para tres niveles de agua en el distribuidor ( $H = 70, 125$  y  $180$  mm ), flujo de entrada de agua de  $30$  L/min y dos flujos de aire: (a)  $Q_{aire}=7.7$  y (b)  $Q_{aire}=10.7$  L/min.**

De la Figura 6.24 (a) se nota que cuando  $\theta = 1$  el valor de  $I$  es aproximadamente de 0.38 para la curva 70307.7, mientras que para las curvas 125307.7 y 180307.7  $I$  toma un valor aproximado de 0.7. Además la inclinación de la pendiente en las curvas de la Figura

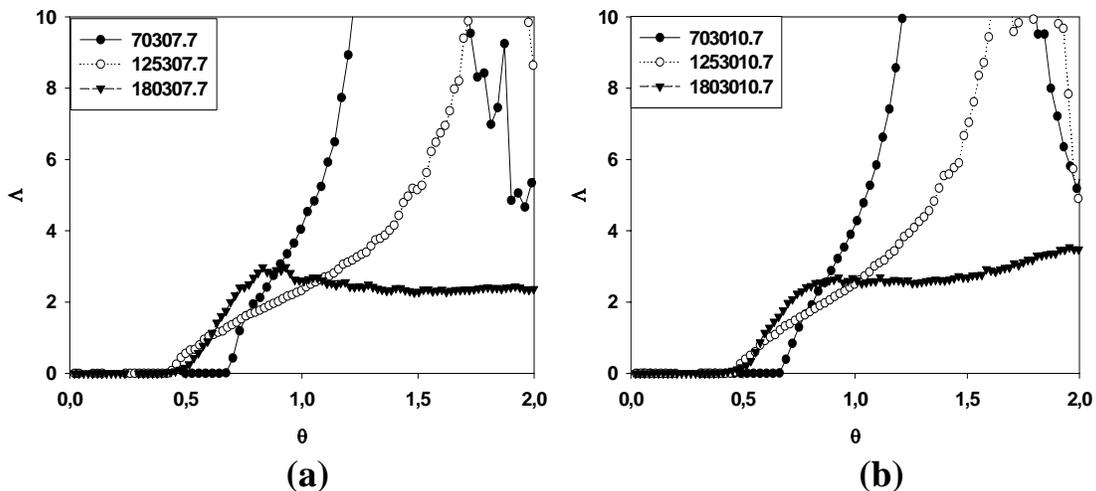
6.24 (a) también permiten hacer un estimado del grado de mezcla presente en cada sistema (ver Figura 2.4) por lo que se espera que:

$$Vm_{(70307.7)} < Vm_{(180307.7)} \leq Vm_{(125307.7)}$$

Estas observaciones coinciden con las estimaciones que se hicieron a partir de las curvas  $E(\theta)$  vs.  $\theta$ .

Cuando  $Q_{aire} = 10.7$  L/min, Figura 6.24 (b), se nota un comportamiento similar. En este caso la curva 703010.7 toma el valor de  $I = 0.4$  cuando  $\theta = 1$ , mientras que las curvas 1253010.7 y 1803010.7 toman el valor de  $I = 0.7$ ; las pendientes de las curvas para  $H = 125$  y  $180$  mm son casi iguales por lo que se espera la misma tendencia en valores de flujo de mezcla observada en el caso en que se aplicó un  $Q_{aire} = 7.7$  L/min. Por otra parte, en ninguna de las gráficas de la Figura 6.24 se nota un descenso rápido de los valores  $I(\theta)$  al inicio de las curvas, lo que indicaría la presencia de volumen en cortocircuito.

Las curvas  $\Lambda(\theta)$  vs.  $\theta$  para cada valor de  $Q_{aire}$  y los tres niveles de agua en el distribuidor se muestran en la Figura 6.25.



**Figura 6.25.- Funciones de distribución  $\Lambda(\theta)$  para tres niveles de agua en el distribuidor ( $H = 70, 125$  y  $180$  mm), flujo de agua en la entrada de  $30$  L/min y dos flujos de aire: (a)  $Q_{aire} = 7.7$  y (b)  $Q_{aire} = 10.7$  L/min.**

En la Figura 6.25 (a) se nota que al disminuir el nivel de agua en distribuidor las curvas correspondientes se disparan más rápidamente hacia valores de  $A \rightarrow +\infty$  cuando  $\theta = 1$ . Según Danckwerts [11] éste comportamiento indica que se puede esperar la siguiente tendencia respecto a los valores de volumen de mezcla:

$$Vm_{(70307.7)} < Vm_{(125307.7)} < Vm_{(180307.7)}$$

Aunque, debido a la forma de la curva 180307.7, es difícil hacer un estimado confiable. El comportamiento que tiene esta curva cerca a  $\theta = 1$  indica la presencia de volumen muerto ya que para valores mayores pero cercanos a  $\theta = 1$  la curva muestra un ligero descenso para después volver a crecer, ver Figura 2.6.

Una tendencia similar se observa cuando  $Q_{\text{aire}} = 10.7$  L/min, Fig. 6.25 (b), donde igualmente se aprecia una parte decreciente de la curva 1803010.7 en la proximidad a  $\theta = 1$  indicando la presencia de volumen muerto. Por otra parte, ninguna de las curvas de la Figura 6.25 muestra un crecimiento rápido para valores de tiempo bajos, lo que indicaría la presencia de fluido en cortocircuito.

Por último la fracción de volumen de agua que pasa por el distribuidor como flujo pistón se obtiene a partir de la gráfica  $F(\theta)$  vs.  $\theta$ . Como ejemplo los resultados del experimento 703010.7 se muestran en la Figura 6.26..

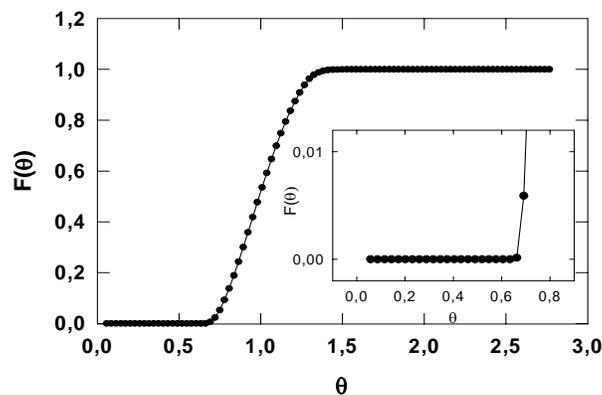
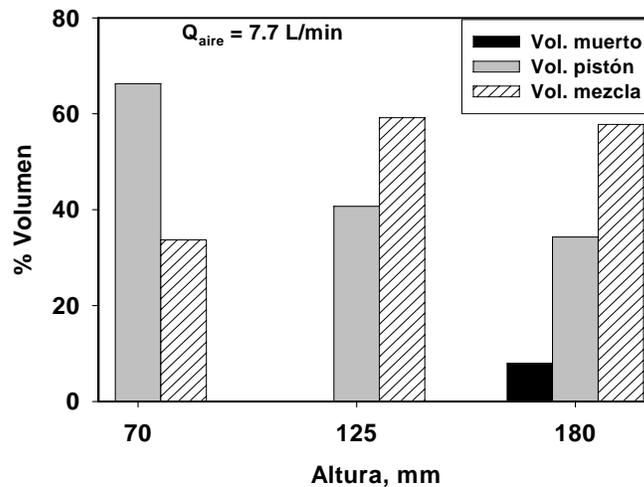


Figura 6.26.- Curva de la función  $F(\theta)$  para el experimento 703010.7.

Se observa que cuando  $F(\theta) = 0.01$ ,  $\theta = 0.68$ . El procedimiento seguido fue idéntico para el resto de los experimentos. Los resultados se muestran en la Tabla 6.4 y se grafican en la Figura 6.27.

**Tabla 6.4.- Porcentajes de volumen muerto, de mezcla perfecta y de flujo pistón para  $Q_{\text{aire}} = 7.7$  y  $10.7$  L/min para tres niveles de agua en el distribuidor y  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min.**

Experimento	$\%(V_d/V)$	$\%(V_m/V)$	$\%(V_p/V)$
70307.7	0	33.7	66.3
703010.7	0	34.7	65.3
125307.7	0.1	59.2	40.7
1253010.7	0.1	56.9	43
180307.7	7.9	57.8	34.3
1803010.7	5.2	54.8	40



**Figura 6.27.- Cantidades relativas de volumen muerto, mezcla y pistón presentes en el distribuidor con  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min,  $Q_{\text{aire}} = 7.7$  L/min y tres alturas.**

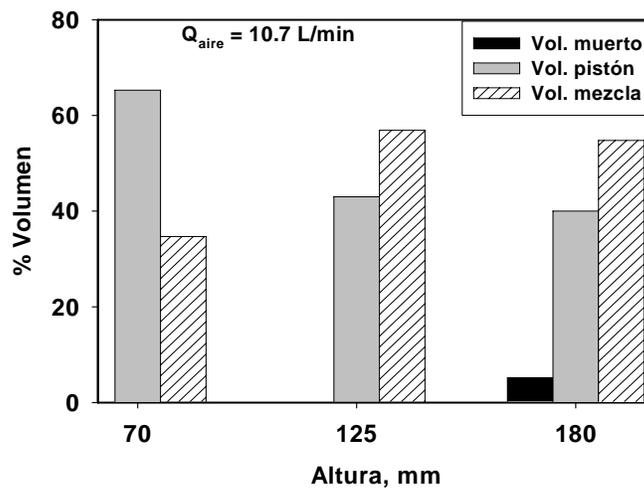
En esta gráfica se nota una tendencia respecto a las cantidades relativas de volúmenes de mezcla y pistón: al aumentar el volumen de agua en el distribuidor aumenta

el volumen de mezcla y disminuye el volumen pistón. Además, los resultados coinciden con las estimaciones hechas a partir de las curvas  $E(\theta)$  vs.  $\theta$  e  $I(\theta)$  vs.  $\theta$ , pues se confirma que

$$Vm_{(70307.7)} < Vm_{(180307.7)} < Vm_{(125307.7)}$$

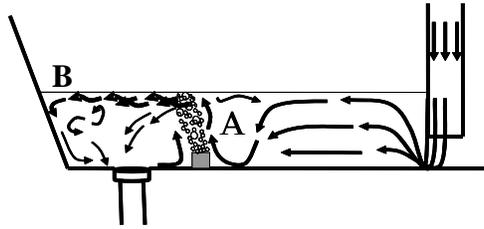
La estimación hecha a partir de las curvas  $A(\theta)$  vs.  $\theta$  no se ajusta del todo a la tendencia anterior pero sí predice la presencia de volumen muerto, que es notable cuando el nivel de agua es de 180 mm.

Para  $Q_{\text{aire}} = 10.7$  L/min la gráfica de calidad de flujo se presenta en la Figura 6.28. En este caso también se aprecia una tendencia similar a la observada para los experimentos en que se usó un flujo de aire de 10.7 L/min. En este caso también coinciden las estimaciones hechas a partir de las curvas  $E(\theta)$  vs.  $\theta$  e  $I(\theta)$  vs.  $\theta$  con los resultados obtenidos. Las curvas  $A(\theta)$  vs.  $\theta$  predicen la presencia de volumen muerto cuando el nivel de agua en distribuidor es de 180 mm aunque no se ajustan a la tendencia estimada.



**Figura 6.28.- Cantidades relativas de volumen muerto, mezcla y pistón presentes en el distribuidor con  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min,  $Q_{\text{aire}} = 10.7$  L/min y tres alturas.**

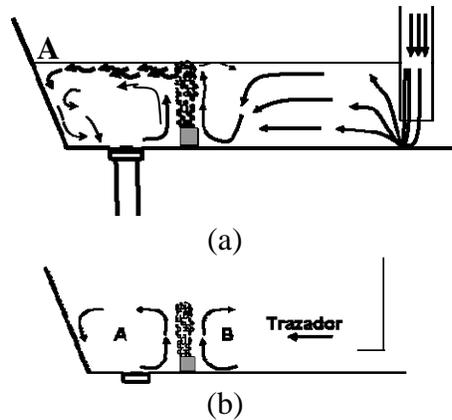
Por otra parte, en la Figura 6.29 se muestra un esquema simplificado del comportamiento del fluido en el distribuidor cuando el nivel de agua es de 70 mm.



**Figura 6.29.- Tendencia del patrón de flujo observada para un experimento con  $H = 70$  mm,  $Q_{\text{agua}} = 30$  L/min y cortina de aire.**

Como lo indican las flechas, después de entrar al distribuidor el trazador se mueve más rápidamente cerca de la superficie libre y más lentamente en el fondo; a medida que avanza hacia la salida el comportamiento se invierte por efecto de las corrientes que generan las cortinas de aire (zona A). Una parte del trazador atraviesa la cortina al ser arrastrado hacia la superficie mientras que la mayoría lo hace por arriba, en la cresta de la cortina. Después de atravesar la cortina una parte del trazador va directo a la buza de salida mientras que el resto sale hacia las paredes del distribuidor. Las corrientes que provocan las cortinas hacen que el colorante se disperse en la zona comprendida entre las paredes del distribuidor y la cortina de aire quedando después de unos instantes una zona aparentemente homogénea en colorante. Al final del experimento no se observan remanentes de colorante en las paredes del extremo izquierdo del distribuidor (zona B), debido a que existe un umbral de color que el ojo puede detectar.

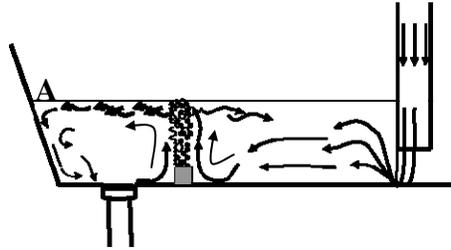
El esquema correspondiente para el nivel de agua de 125 mm se muestra en la Figura 6.30.



**Figura 6.30.-**(a) Tendencia del patrón de flujo para el experimento con  $H = 125$  mm y (b) corrientes de convección generadas por las cortinas de aire.

En la Figura 6.30 (a) se ve que la porción de fluido con mayor velocidad está en el fondo del distribuidor debido a que las cortinas de aire provocan corrientes de convección, ver Figura 6.30 (b). En este caso la cortina de aire actúa como barrera que detiene e incluso regresa una parte del trazador a la zona B y simultáneamente la cantidad que atraviesa la cortina es lanzada hacia la zona A, principalmente por la parte superior de la cortina, de modo que para un instante dado el trazador se encuentra disperso tanto en la zona A como en la B del distribuidor, Figura 6.30 (b). De manera muy simplificada se puede decir que el momentum generado por la cortina de burbujas se opone al momentum del líquido provocando que el trazador se detenga, lo que finalmente resulta en tiempos de permanencia mayores. Al entrar a la zona A el trazador es llevado por las corrientes de circulación que provocan las cortinas de aire, es dispersado en la zona y en pocos segundos es imposible detectar patrón de flujo alguno pues se aprecia únicamente una mezcla homogénea de colorante y agua en la zona de salida. En éste experimento tampoco se observa la presencia de remanentes de colorante en las cercanías de A.

Para el experimento con la altura de 180 mm el comportamiento es muy parecido al de 125 mm, como se puede notar de la Figura 6.31.



**Figura 6.31.- Tendencia del patrón de flujo para el experimento con  $H = 180$  mm.**

Después de entrar al distribuidor y debido al aumento en volumen de agua, el trazador ya no alcanza a llegar a la superficie libre sino que es arrastrado en el fondo por las corrientes que generan las cortinas de aire. Al acercarse a las burbujas el trazador es detenido y luego llevado hacia arriba donde una parte atraviesa a la zona A y otra es regresada a la zona B, Figura 6.30 (b). De las filmaciones es posible notar que para este experimento se regresa una mayor cantidad de colorante lo que provoca un aumento en el tiempo de permanencia del trazador en el distribuidor. A tiempos relativamente grandes es imposible detectar la acumulación de colorante en algún rincón del reactor debido a la agitación que provocan las cortinas y al umbral de color en el que es posible detectar la presencia de colorante.

## Capítulo 7. Conclusiones

Para los experimentos sin cortinas de aire se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Independientemente del flujo de agua aplicado en la entrada, al aumentar el nivel de agua en el distribuidor también aumenta el flujo de mezcla completa y por el contrario el de tipo pistón disminuye.
2. Las mejores características de flujo las muestran los experimentos en que se aplicó un flujo de agua en la entrada de 30 L/min, pues en ninguno de ellos se detecta cantidad significativa de volumen muerto. Los valores correspondientes de flujo pistón y de mezcla obtenidos para los dos flujos de agua en la entrada y un nivel de agua dado no muestran diferencias considerables. Sin embargo, la aplicación del flujo de 20 L/min propició la formación de volumen muerto para niveles de agua altos.
3. No hay una diferencia considerable en cuanto a los patrones de flujo observados independientemente del flujo de agua aplicado en la entrada y del nivel de agua en el distribuidor. Sin embargo, se detectó una zona en los extremos del distribuidor en donde el fluido se mueve más lentamente facilitando la existencia de volumen muerto cuando los niveles de agua son altos.

Para los experimentos con cortinas de aire las conclusiones son:

1. Aplicar un nivel de flujo de aire u otro no genera diferencias considerables en los correspondientes valores de flujo pistón y de mezcla si se mantienen constantes el flujo de agua en la entrada y el nivel de agua en distribuidor.
2. El aumento en el nivel de agua del distribuidor provoca una disminución en el nivel de flujo pistón independientemente del flujo de aire aplicado.
3. El aumento en el nivel de agua del distribuidor causa una disminución en la cantidad de volumen activo (volumen mezcla + volumen pistón) y provoca la presencia de volumen muerto que es notable para niveles de agua altos.
4. Las cortinas de aire provocan que el trazador se dirija hacia la superficie pero también que se detenga y tarde más tiempo en salir del distribuidor causando la presencia de volumen muerto para niveles de agua altos. Este efecto es mayor cuando el flujo de aire es de 7.7 L/min.
5. Las corrientes que generan las cortinas de aire provocan que el trazador se mueva continuamente del fondo del distribuidor a la superficie y viceversa facilitando la mezcla entre sí de las diferentes porciones de fluido, sin embargo también provocan que el colorante se disperse por lo que es difícil detectar alguna posible zona de estancamiento.
6. Las mejoras características de flujo se tuvieron para los experimentos en que el nivel de agua fue de 125 mm, independientemente del flujo de aire aplicado para

generar las cortinas de aire. Para todos los experimentos en que el nivel de agua fue de 180 mm se detectó volumen muerto, mientras que para los casos en que el nivel fue de 70 mm se llegó a detectar la presencia de vórtices en la zona de salida.

En general se observó que la calidad y patrones de flujo mostraron mejores resultados en los experimentos en que no se usaron cortinas de aire como inhibidores de flujo.

Se notó que para los experimentos en que se usaron cortinas de aire los valores de los flujos de aire usados fueron altos pues, por una parte, en todos los experimentos se formó una cresta de burbujas en la superficie libre y por otra parte, aunque el trazador fue detenido y arrastrado a la zona de escoria también fue llevado de regreso hacia la zona de entrada en donde otras corrientes lo llevaron nuevamente al fondo del distribuidor. Ninguna de estas situaciones es benéfico para la calidad del acero pues en el primer caso la presión que ejercen las cortinas de aire provoca que exista una zona turbulenta en la intercara escoria-metal líquido lo cual no contribuye a la remoción de inclusiones pues eventualmente ocasionarán el desprendimiento y arrastre de escoria hacia el seno del metal líquido en un proceso real y en el segundo caso se incrementan los tiempos de residencia y no se favorece la presencia de flujo tipo pistón. Como nueva ruta de estudio se propone reducir el valor de flujo de aire de modo que éste facilite el desplazamiento del trazador hacia la superficie de una manera no turbulenta, sin llegar a alterar la zona de la intercara escoria-metal líquido así como también colocar las cortinas de aire cerca de la entrada al distribuidor y/o en un arreglo distinto para el que existan otros tipos de inhibidores de flujo junto con las cortinas de aire de modo que se

evite el arrastre de escoria hacia el seno del metal líquido y que en la zona de salida del distribuidor el fluido esté libre de turbulencia.

Por otra parte, se observó que operar con niveles de agua en distribuidor intermedios, con o sin cortinas de aire, es recomendable pues en ninguno de los casos se registra la presencia de volumen muerto; a niveles bajos de agua en distribuidor se detectó la formación de vórtices que eventualmente arrastrarán la escoria hacia los moldes y a niveles altos es más probable tener volúmenes muertos que provocan la pérdida de temperatura del metal líquido en un proceso real de colada continua.

## Índice de figuras

Figura 2.1. El proceso de colada continua.....	4
Figura 2.2. Curvas $F$ y $C$ típicas del patrón de flujo en la corriente de salida de un reactor.....	13
Figura 2.3. Distribución de edad, interna y a la salida, para dos casos límite: a) mezcla completa; b) flujo pistón y c) un caso intermedio.....	14
Figura 2.4. Función de distribución de edad para un grado de mezcla relativamente pequeño.....	16
Figura 2.5. Identificación de la existencia de fluido en cortocircuito para las funciones $E(\theta)$ e $I(\theta)$ .....	17
Figura 2.6. Efecto de cortocircuito y espacio muerto sobre la función de intensidad $A(\theta)$ .....	17
Figura 2.7. Modelo combinado, representación de volumen pistón y de mezcla perfecta .....	18
Figura 4.1. Dimensiones: a) del modelo físico y b) de las piezas de arena usadas para generar las cortinas de aire.....	23
Figura 4.2. Esquema del sistema y equipo empleado.....	24
Figura 5.1. Variación del $\Delta\text{pH}$ con respecto al tiempo, en tres experimentos (P, Q y R) para la condición $H = 125$ mm, $Q_{\text{agua}}=30$ L/min, sin cortinas de aire.....	30
Figura 5.2. Variación del $\Delta\text{pH}$ con respecto al tiempo, en tres experimentos para la condición $H = 125$ mm, $Q_{\text{agua}}=30$ L/min y $Q_{\text{aire}}=10.7$ L/min.....	31

Figura 5.3. Datos experimentales (puntos) e interpolados (línea) para el experimento 12530.....	32
Figura 5.4. Variación del $\Delta pH$ con respecto al tiempo, para tres niveles de agua en el distribuidor con $Q_{\text{agua}} = 30$ L/min constante.....	33
Figura 5.5. Variación del $\Delta pH$ con respecto al tiempo para dos valores de flujo de agua en la entrada ( $Q_{\text{agua}} = 20$ y $30$ L/min) con (a) $H=70$ mm, (b) $H=125$ mm y (c) $H=180$ mm constantes.....	34
Figura 5.6. Variación del $\Delta pH$ con respecto al tiempo para dos valores de flujo de aire ( $Q_{\text{aire}} = 7.7$ y $10.7$ L/min), con (a) $H=70$ mm, (b) $H=125$ mm y (c) $H=180$ mm.....	35
Figura 5.7. Variación del $\Delta pH$ con respecto al tiempo para tres niveles de agua en el distribuidor y $Q_{\text{aire}} = 7.7$ L/min, $Q_{\text{agua}} = 30$ L/min.....	37
Figura 5.8. Variación del $\Delta pH$ con respecto al tiempo para tres niveles de agua en distribuidor y $Q_{\text{aire}} = 10.7$ L/min, $Q_{\text{agua}} = 30$ L/min.....	39
Figura 5.9. Experimento 7030 : (a) Curvas $\Delta pH$ vs. tiempo y (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor. La línea punteada indica el umbral debajo del cual, visualmente, ya no se distingue colorante.....	40
Figura 5.10. Experimento 12530: (a) curvas $\Delta pH$ vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor.....	41
Figura 5.11. Experimentos 7020 y 7030: (a) curvas $\Delta pH$ vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor (experimento 7020) y (c) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor (experimento 7030).....	42
Figura 5.12. Experimentos 70307.7 y 703010.7: (a) curvas $\Delta pH$ vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor (experimento 70307.7) y (c) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor (experimento 703010.7).....	43

Figura 5.13. Experimento 703010.7: (a) curvas $\Delta pH$ vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor.....	45
Figura 5.14. Experimento 1253010.7: (a) curvas $\Delta pH$ vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor.....	46
Figura 5.15. Experimento 1803010.7: (a) curvas $\Delta pH$ vs. tiempo, (b) instantáneas de la distribución del colorante en el distribuidor.....	48
Figura 6.1. Funciones de distribución $E(\theta)$ para tres niveles de agua en el distribuidor: $H = 70, 125$ y $180$ mm, y $Q_{\text{agua}} = 20$ L/min en la entrada.....	51
Figura 6.2. Funciones de distribución $E(\theta)$ para tres niveles de agua en el distribuidor: $H = 70, 125$ y $180$ mm y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min en la entrada.....	52
Figura 6.3. Funciones de distribución $I(\theta)$ para tres niveles de agua en distribuidor ( $H = 70, 125$ y $180$ mm) y dos flujos de agua en la entrada: (a) $Q_{\text{agua}}=20$ y (b) $Q_{\text{agua}}=30$ L/min.....	52
Figura 6.4. Funciones de distribución $\Lambda(\theta)$ para tres niveles de agua en el distribuidor ( $H = 70, 125$ y $180$ mm) y dos flujos de agua en la entrada: (a) $Q_{\text{agua}}= 20$ y (b) $Q_{\text{agua}}= 30$ L/min.....	53
Figura 6.5. Función de distribución $F(\theta)$ para el experimento 12530.....	54
Figura 6.6. Porcentajes de los tipos de flujo presentes en el distribuidor. $Q_{\text{agua}} = 20$ L/min y tres niveles de agua, sin cortina de aire.....	56
Figura 6.7. Porcentajes de los tipos de flujo presentes en el distribuidor. $Q_{\text{agua}} = 30$ L/min y tres niveles de agua, sin cortina de aire.....	56
Figura 6.8. Representación esquemática del patrón de flujo observado para los experimentos sin cortina de aire y con flujos de agua de 20 o 30 L/min.....	57

Figura 6.9. Funciones de distribución $E(\theta)$ . H=70 mm de agua en el distribuidor, con $Q_{\text{agua}}=20$ L/min y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min en la entrada.....	58
Figura 6.10. Funciones de distribución $E(\theta)$ . H=125 mm de agua en el distribuidor, con $Q_{\text{agua}}=20$ L/min y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min en la entrada.....	59
Figura 6.11. Funciones de distribución $E(\theta)$ . H=180 mm de agua en el distribuidor, con $Q_{\text{agua}}=20$ L/min y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min en la entrada.....	59
Figura 6.12. Funciones de distribución $I(\theta)$ . H =70 mm de agua en el distribuidor con $Q_{\text{agua}}=20$ L/min y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min en la entrada.....	60
Figura 6.13. Funciones de distribución $I(\theta)$ . H =125 mm de agua en el distribuidor con $Q_{\text{agua}}=20$ L/min y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min en la entrada.....	61
Figura 6.14. Funciones de distribución $I(\theta)$ . H =180 mm de agua en el distribuidor con $Q_{\text{agua}}=20$ L/min y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min en la entrada.....	61
Figura 6.15. Funciones de distribución $\Lambda(\theta)$ . H =70 mm de agua en distribuidor para dos flujos de agua en la entrada: $Q_{\text{agua}}=20$ y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min.....	62
Figura 6.16. Funciones de distribución $\Lambda(\theta)$ para H =125 mm de agua en distribuidor, con dos flujos de agua en la entrada: $Q_{\text{agua}}=20$ y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min.....	62
Figura 6.17. Funciones de distribución $\Lambda(\theta)$ . H =180 mm de agua en distribuidor para dos flujos de agua en la entrada: $Q_{\text{agua}}=20$ y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min.....	63
Figura 6.18. Porcentajes de los tipos de flujo presentes en el distribuidor para H = 70 mm y dos flujos de agua en la entrada $Q_{\text{agua}}=20$ L/min y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min, sin cortinas de aire....	64
Figura 6.19. Porcentajes de los tipos de flujo presentes en el distribuidor para H=125 mm y dos flujos de agua en la entrada: $Q_{\text{agua}}=20$ L/min y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min, sin cortinas de aire....	65
Figura 6.20. Porcentajes de los tipos de flujo presentes en el distribuidor. H=180 mm y dos flujos de agua en la entrada $Q_{\text{agua}}=20$ L/min y $Q_{\text{agua}}=30$ L/min, sin cortinas de aire.....	65

Figura 6.21. Funciones de distribución $E(\theta)$ para $Q_{\text{aire}}=0, 7.7$ y $10.7$ L/min, (a) $H=70$ mm, (b) $125$ mm y (c) $180$ mm. Con $Q_{\text{agua}}= 30$ L/min para todos los casos.....	67
Figura 6.22. Cantidades relativas de volumen muerto, mezcla completa y pistón presentes en el distribuidor con $Q_{\text{aire}} = 0, 7.7$ y $10.7$ L/min, $Q_{\text{agua}} = 30$ L/min, para: (a) $H=70$ mm, (b) $H=125$ mm y (c) $H=180$ mm.....	70
Figura 6.23. Funciones de distribución $E(\theta)$ para tres niveles de agua en el distribuidor ( $H =70, 125$ y $180$ mm ), flujo de entrada de agua de $30$ L/min y dos flujos de aire: (a) $Q_{\text{aire}}=7.7$ y (b) $Q_{\text{aire}}=10.7$ L/min.....	72
Figura 6.24. Funciones de distribución $I(\theta)$ para tres niveles de agua en el distribuidor ( $H =70, 125$ y $180$ mm ), flujo de entrada de agua de $30$ L/min y dos flujos de aire: (a) $Q_{\text{aire}}=7.7$ y (b) $Q_{\text{aire}}=10.7$ L/min.....	73
Figura 6.25. Funciones de distribución $A(\theta)$ para tres niveles de agua en el distribuidor ( $H =70, 125$ y $180$ mm), flujo de agua en la entrada de $30$ L/min y dos flujos de aire: (a) $Q_{\text{aire}}=7.7$ y (b) $Q_{\text{aire}}=10.7$ L/min.....	74
Figura 6.26. Curva de la función $F(\theta)$ para el experimento 703010.7.....	75
Figura 6.27. Cantidades relativas de volumen muerto, mezcla y pistón presentes en el distribuidor con $Q_{\text{agua}} = 30$ L/min, $Q_{\text{aire}} = 7.7$ L/min y tres alturas.....	76
Figura 6.28. Cantidades relativas de volumen muerto, mezcla y pistón presentes en el distribuidor con $Q_{\text{agua}} = 30$ L/min, $Q_{\text{aire}} = 10.7$ L/min y tres alturas.....	77
Figura 6.29. Tendencia del patrón de flujo observada para un experimento con $H = 70$ mm, $Q_{\text{agua}} = 30$ L/min y cortina de aire.....	78
Figura 6.30.a) Tendencia del patrón de flujo para el experimento con $H = 125$ mm y (b) Corrientes de convección generadas por las cortinas de aire.....	79
Figura 6.31. Tendencia del patrón de flujo para el experimento con $H = 180$ mm.....	80

## Índice de tablas

Tabla 4.1.- Variables de operación para experimentos en que no se usaron cortinas de aire.....	25
Tabla 4.2.- Variables de operación para experimentos en que se usaron cortinas de aire.....	26
Tabla 6.1.- Porcentajes de volumen muerto, de mezcla perfecta y de flujo pistón para $Q_{\text{agua}}=20$ y $30$ L/min de agua en la entrada y tres niveles de agua en el distribuidor.....	55
Tabla 6.2.- Porcentajes de volumen muerto, de mezcla perfecta y de flujo pistón para $Q_{\text{agua}}=20$ y $30$ L/min de agua en la entrada y tres niveles de agua en el distribuidor.....	64
Tabla 6.3.- Porcentajes de volumen muerto, de mezcla perfecta y de flujo pistón para $Q_{\text{aire}} = 7.7$ y $10.7$ L/min para tres niveles de agua en el distribuidor y $Q_{\text{agua}} = 30$ L/min.....	69
Tabla 6.4.- Porcentajes de volumen muerto, de mezcla perfecta y de flujo pistón para $Q_{\text{aire}} = 7.7$ y $10.7$ L/min para tres niveles de agua en el distribuidor y $Q_{\text{agua}} = 30$ L/min.....	76

## Capítulo 8. Bibliografía

1. M. Javurek. Continuous Casting Process. 2008. Disponible en:  
URL:[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lingotamento\\_Continuo-Continuous\\_Casting.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lingotamento_Continuo-Continuous_Casting.png). Consultado: Agosto 2009.
2. Y. Sahai y T. Emi. Tundish Technology for clean steel production. Ed World Scientific; 2007, p 79-158.
3. Íbid. p 181-200.
4. J. Szekely. The mathematical and physical modelling of metals processing operations. Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of technology. Cambridge Massachusetts p 277-289.
5. D. Mazumdar, G. Yamanoglu, R. Shankarnarayanan, R. Guthrie. Similarity Considerations in the Physical Modelling of Steel Making Tundish System. Steel Research, Vol. 66 (1995), No. 1 p 14-19.
6. Y. Sahai, T. Emi. Criteria for Water Modeling of Melt in Continuous Casting Tundishes. ISIJ International, Vol. 36 (1 996), No. 9, p 1166-1167.
7. D. M. Himmelblau, K. B. Bischoff. Análisis y simulación de procesos, Ed Reverté, 1ª edición 1996, p. 127-170.
8. Ibid. p 128-136.
9. Ibid p 137-138.
10. Ibid. p 143.
11. Ibid. p 153-164.

12. Y. Sahai, T. Emi. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 36 (1996) p 667-672.
13. Ibid. p 670.
14. S. López-Ramírez, J. de J. Barreto, J. Palafox-Ramos, R.D. Morales y D. Zacharias. Modelling Study of the Influence of Turbulence Inhibitors on the Molten Steel Flow, Tracer Dispersion and Inclusion Trajectories in Tundishes. Metallurgical and Materials Transactions B. Vol. 32B (2001) p 615-627.
15. Y. He, Y. Sahai. The Effect of Tundish Wall Inclination on the Fluid Flow and Mixing: A Modeling Study. Metallurgical Transactions B Vol. 18B (1987) p 81-92.
16. P.V. Danckwerts. Continuous Flow Systems. Distribution of Residence Times. Chemical Engineering Science Vol. 2, 1-13 (1953) p 3857-3866.
17. L. Zhong, L. Li, B. Wang, M Jiang, L. Zhu, L Zhang y R. Chen. Water Modelling Experiments of Argon Bubbling Curtain in a Slab Continuous Casting Tundish. Steel Research International, Vol. 77 (2006) No. 2, p 103-106.
18. L. Chong, L. Li, L. Zhang, L. Zhu, Q. Zhang. Fluid Flow Behaviour in Slab Continuous Casting Tundish with Different Configurations of Gas Bubbling Curtain. Ironmaking & Steelmaking. Vol. 35 No. 6 (2008) p 436-440
19. A. Ramos-Banderas, R.D. Morales, L. García-Demedices, M. Díaz-Cruz. Mathematical Simulation and Modelling of Steel Flow with Gas Bubbling in Through Type Tundishes. ISIJ Vol. 43 (2003), No. 5 p 653-662.
20. Y. Sahai, R. Ahuja. Fluid Flow and Mixing of Melt in steelmaking Tundishes. Ironmaking & Steelmaking. Vol. 13 No. 5 (1986) p 241-247.
21. K. Hermann-Tacke, J. Ludwig. Steel Flow and Inclusion Separation in Continuous Casting Tundishes. Steel Research Vol. 58. No. 6 (1987) p262-269

22. O. J. Ilegbusi, J. Szekeli. Fluid Flow and Tracer Dispersion in Shallow Tundishes. Steel Research Vol. 59 (1988) No. 9 p 399-405.
23. J. Szekely, J.W. Evans y J.K. Brimacombe. The Mathematical and Physical Metals Processing Operations. USA. Ed. John Wiley and Sons, 1988.
24. J. Szekely, N.J. Themelis. Rate Phenomena in Process Metallurgy..USA. Ed Wiley Interscience; 1971.
25. O. Levenspiel. Chemical Reaction Engineering. USA. Ed Wiley & Sons, 2a Edición; 1972.
26. L. Wang, H. Lee, P. Hayes. A New Approach to Molten Steel Retining Using Fine Gas Bubbles. ISIJ International, Vol. 36 (1 996), No. I , p 17-24.
27. H. Bai, B. G. Thomas. Turbulent Flow of Liquid Steel and Argon Bubbles in Slide-Gate Tundish Nozzles: Part I. Model Development and Validation. Metallurgical and Materials Transactions B Vol 32B, Abril 2001—p 253
28. J. P. Rogler. Modeling of Inclusion Removal in a Tundish by Gas Bubbling. Theses and Dissertations (2004) Disponible en URL: <http://digitalcommons.ryerson.ca/cgi>. Consultado: Agosto 2009
29. T. Debroy, J.A. Sychterz. Numerical calculation of fluid flow in a continuous casting tundish. Metallurgical Transactions B Vol. 16B, Septiembre 1985 p 497-504.
30. A. Kumar, S. C. Koria, D. Mazumdar. An Assessment of Fluid Flow Modelling and Residence Time Distribution Phenomena in Steelmaking Tundish Systems. ISIJ International, Vol. 44 (2004), No. 8, p 1334–1341.
31. D. Mazumda, R. I. L. Guthrie. The Physical and Mathematical Tundish Systems. ISIJ Internationa[, Vol. 39 (1999), No. 6, p 524-547.

32. H. Okumura. Recent Trends and Future Prospects of Continuous Casting Technology. Nippon Steel Technical Report No. 61 1994 p 9-14
33. K. Miyazawa. Continuous Casting of Steels in Japan. Science and Technology of Advanced Materials. Vol. 2 (2001) p 59-65.
34. K. Marukawa, S. Hara, M Sano. Prospect of Innovative Steel-making Process in the Forth Coming Century. ISIJ, Int. Vol. 41 (2001), Suplemento p S36-S41.
35. R.W. Crowley, G.D. Lawson y B.R. Jardine. Cleanliness Improvements using a Turbulence-suppressing Tundish Impact Pad. 1996, p 1-5. Disponible en: URL: [http://www.foseco-steel.com/steel/downloads/technical\\_papers/07.pdf](http://www.foseco-steel.com/steel/downloads/technical_papers/07.pdf). Consultado: Agosto 2007.
36. A. E. Dainton. Development of a Novel Tundish Flow System. The Application and Results in North American Steelplants. 1997. p 1-3. Disponible en URL: [http://www.foseco-steel.com/steel/downloads/technical\\_papers/03.pdf](http://www.foseco-steel.com/steel/downloads/technical_papers/03.pdf). Consultado: Agosto 2007.
37. D. Zacharias , Roy Phillips. The Integrated Tundish:A Comprehensive Approach To Tundish Flow Control Design. 2003, p 1-4. Disponible en URL: [http://www.foseco-steel.com/steel/downloads/technical\\_papers/11.pdf](http://www.foseco-steel.com/steel/downloads/technical_papers/11.pdf). Consultado: Agosto 2007.
38. M. Hojo, R. Nakao, T. Umezaki, H. Kawai, S. Tanaka, S. Fukumoto. Oxide Inclusion Control in Ladle for producing clean stainless steel. ISIJ International, Vol 36 (1996), Suplemento, p S128-S131.
39. P. Kovac, J. Kijac, V. Masek. Steel cleanliness improvement through tundish configuration optimizing. Metalurgija 42 (2003) 4, p 249-255.
40. M. Javurek, B. Kaufmann, G. Zuba, P. Gittler. Inclusion separation in tundishes – some new general aspects. Steel Research 73 (2002) No. 5, p 1-8.

41. G. Solorio Díaz. Control de la turbulencia y flujo del acero líquido en un distribuidor de colada continua mediante la buza de alimentación. [Tesis doctoral] México, D.F. Instituto Politécnico Nacional; 2004.
42. B. Kozac, J. Dzierzawski. Continuous Casting of Steel: Basic Principles. Disponible en: URL:[http://www.energymanagertraining.com/iron\\_steel/cont\\_cast\\_steel.htm](http://www.energymanagertraining.com/iron_steel/cont_cast_steel.htm). Consultado: Agosto 2009.
43. B. Kiflie, D. Alemu. Thermal Analysis of Continuous Casting Process. 2000. Disponible en URL: <http://home.att.net/~africantech/ESME/contcast/Casting1.htm>. Consultado: Agosto 2009.
44. Continuous Casting Consortium. Introduction to Continuous Casting. Disponible en: URL:<http://ccc.illinois.edu/introduction/overview.html>. Consultado: Julio 2009.