

01174



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FLUJO CONTRACORRIENTE TRANSITORIO DE DOS FLUIDOS INMISCIBLES

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la  
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el  
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Armando Pérez Delgado

FECHA: 3 agosto 2005

FIRMA:

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA PETROLERA**

Presenta:

**Armando Pérez Delgado**

Director de tesis:

**Dr. Yuri V. Fairuzov**



**Cd. Universitaria, México, DF., 2005**

m 346565



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **AGRADECIMIENTOS**

Un eterno agradecimiento a mi Padre y a mi Madre por toda su paciencia y comprensión.

# **CONTENIDO**

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	4
<b>RESUMEN</b>	5
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	6
<b>LISTA DE FOTOS</b>	8
<b>LISTA DE TABLAS</b>	8
<b>NOMENCLATURA</b>	9
<b>1. INTRODUCCION</b>	11
<b>1.1 Descripción del problema</b>	11
<b>1.2 Descripción del trabajo desarrollado</b>	14
<b>2. ANTECEDENTES</b>	15
<b>3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL</b>	19
<b>3.1 Instalación experimental</b>	19
3.1.1 Selección del fluido de trabajo	27
3.1.2 Sección de pruebas	28
3.1.3 Separador	33
3.1.4 Tanques de almacenamiento	36
3.1.5 Bombas	37
3.1.6 Sistema de adquisición de datos	37
3.1.7 Calibración e instalación de los medidores de flujo	38

<b>3.2</b>	<b>Análisis de incertidumbre</b>	43
3.2.1	Exactitud, precisión y error	43
3.2.2	Cifras significativas	44
3.2.3	Método para determina el colgamiento del agua	46
3.2.4	Limite de precisión, limite de desviación e incertidumbre	50
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL</b>	56
4.1	Descripción del experimento	56
4.2	Resultados del experimento	59
4.2.1	Primera prueba experimental	60
4.2.2	Segunda prueba experimental	63
<b>5.</b>	<b>MODELADO MATEMÁTICO</b>	66
5.1	Descripción del modelo	66
5.2	Ecuaciones gobernantes	67
5.3	Relaciones constitutivas	69
5.4	Condiciones iniciales y de frontera	70
5.5	Resultados de las simulaciones	71
5.5.1	Predicción de la primera prueba	72
5.5.2	Predicción de la segunda prueba	74
<b>6.</b>	<b>ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	76
6.1	Comparación de los perfiles transitorios de colgamiento de agua de la primera prueba	76
6.3	Comparación de los perfiles transitorios de colgamiento de agua de la segunda prueba	85
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	93
7.1	Conclusiones	93
7.2	Contribuciones	95
7.3	Recomendaciones para trabajos futuros	95
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	97
	<b>ANEXO A</b>	100
	<b>ANEXO B</b>	104

## RESUMEN

El flujo contracorriente con flujo neto cero ocurre al suspender repentinamente el flujo en las líneas de producción de hidrocarburos que transportan agua-aceite. En el presente trabajo se realiza un estudio experimental de flujo transitorio contracorriente de dos fluidos inmiscibles aceite y agua. Para la realización del estudio se diseñó y construyó una instalación experimental, de la que se obtuvieron datos del colgamiento del agua durante el flujo contracorriente en una tubería con un ángulo de inclinación de  $0.35^\circ$ . Los datos experimentales obtenidos se comparan contra las predicciones del modelo de dos fluidos para flujo contracorriente, en el que se desarrolla una nueva formulación para la ecuación combinada de balance de momento para calcular el efecto del colgamiento de agua. Este estudio experimental contribuye a entender más a fondo el comportamiento del flujo contracorriente de dos fluidos inmiscibles en una tubería.

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquema del sistema de producción	13
3.1	Esquema simplificado de la instalación experimental de flujo multifásico	20
3.2	Dibujo a escala de la planta y perfil del circuito experimental de flujo multifásico	23
3.3	Detalle de la planta del circuito experimental de flujo multifásico	24
3.4	Esquema de la posición de las válvulas para estrangular los flujos	25
3.5	Esquema del funcionamiento del paso alterno	26
3.6	Sección de desarrollo	28
3.7	Tubería de estudio	29
3.8	Diferentes configuraciones que puede adoptar el circuito	30
3.9	Soportes de la tubería del circuito	31
3.10	Características internas del separador	33
3.11	Separador colocado a 1.7m del suelo	34
3.12	Tanque para almacenamiento de aceite	36
3.13	Tanque para almacenamiento de agua	37
3.14	Equipo para la adquisición de datos	38
3.15	Recomendaciones para la instalación del medidor	39
3.16	Altura “Hm” del medidor de flujo	39
3.17	Instalación del transductor sensor	40
3.18	Esquema de los medidores y las válvulas de aforo	42
3.19	Medición y cifras significativos	45
3.20	Graduación para medir la fracción volumétrica	47
3.21	Corrección de la altura de la interfase	48
4.1	Puntos de medición del colgamiento de agua en la tubería	57
4.2	Distribución inicial de las fases en la sección de pruebas	57
4.3	Para $t=0$ se realiza el cierre de las válvulas	58
4.4	Inicia el flujo contracorriente transitorio	58
4.5	Distribución final de las fases en la tubería	59
4.6	Variación del colgamiento de agua (primera prueba)	61

4.7	Perfiles transitorios de colgamiento de agua en la tubería. (primera prueba)	62
4.8	Variación del colgamiento de agua (segunda prueba)	64
4.9	Perfiles transitorios de colgamiento de agua en la tubería. (primera prueba)	65
5.1	Flujo contracorriente de dos líquidos inmiscibles en una tubería inclinada	66
5.2	Variación del colgamiento de agua (primera prueba)	72
5.3	Perfiles transitorios de colgamiento de agua en la tubería (primera prueba)	73
5.4	Variación del colgamiento de agua (segunda prueba)	74
5.5	Perfiles transitorios de colgamiento de agua en la tubería (segunda prueba)	75
6.1.1	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 15s$	77
6.1.2	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 30s$	78
6.1.3	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 45s$	79
6.1.4	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 60s$	80
6.1.5	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 120s$	81
6.1.6	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 180s$	82
6.1.7	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 360s$	83
6.1.8	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 720s$	84
6.3.1	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 15s$	85
6.3.2	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 30s$	86
6.3.3	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 45s$	87
6.3.4	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 60s$	88
6.3.5	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 120s$	89
6.3.6	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 180s$	90
6.3.7	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 360s$	91
6.3.8	Comparación de los perfiles de colgamiento de agua a $t = 720s$	92
A1	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.00$	100
A2	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.16$	101
A3	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.33$	101
A4	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.50$	102
A5	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.66$	102
A6	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.83$	103



A7	Variación del colgamiento de agua en $X/L=1.00$	103
B1	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.00$	104
B2	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.16$	105
B3	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.33$	105
B4	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.50$	106
B5	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.66$	106
B6	Variación del colgamiento de agua en $X/L=0.83$	107
B7	Variación del colgamiento de agua en $X/L=1.00$	107

## **LISTA DE FOTOS**

3.1	Válvulas estranguladoras de flujo	25
3.2	Paso alterno realizado en la instalación.	26
3.3	Marcos de acero del circuito	32
3.4	Equipos instalados para el manejo de los líquidos	35
3.5	Medidores de flujo y válvulas para aforo	42
3.6	Graduación externa de la tubería de estudio en un punto	46

## **LISTA DE TABLAS**

3.1	Valores de la constante K	41
3.1	Obtención del colgamiento de agua a partir de la lectura en la tubería	50
4.1	Propiedades de los líquidos utilizados	59

## NOMENCLATURA

- L = Longitud total de la tubería
- D = Diámetro interno de la tubería.
- R = Radio de la tubería.
- A = Área interna de la sección del tubo.
- Re = Radio externo de la tubería.
- Ri = Radio interno
- x = Fracción de la longitud total de la tubería.
- t = Segundos.
- $\alpha_a$  = Fracción volumétrica de la fracción a
- $\alpha_b$  = Fracción volumétrica de la fracción b

- $U_a$  = Velocidad de la fase a  
 $U_b$  = Velocidad de la fase b  
 $U_m$  = Velocidad de la mezcla  
 $\rho_a$  = densidad de la fase a  
 $\rho_b$  = densidad de la fase b  
 $S_a$  = Perímetro mojado de la fase a  
 $S_b$  = Perímetro mojado de la fase b  
 $S_i$  = Perímetro de la interfase  
 $P_{ia}$  = Perímetros interfaciales de la fase a  
 $P_{ib}$  = Perímetro interfacial de la fase b  
 $g$  = Aceleración de la gravedad  
 $\tau_b$  = esfuerzo cortante en la pared de la fase b  
 $\tau_a$  = esfuerzo cortante en la pared de la fase a  
 $\tau_i$  = esfuerzo cortante interfacial  
 $h_a$  = altura de la fase a  
 $h_b$  = altura de la fase b  
 $F$  = cantidad de movimiento  
 $\gamma$  = Angulo medido a partir de la vertical, hasta el radio externo.  
 $\beta$  = Angulo de inclinación de la tubería.  
 $\alpha$  = Angulo medido a partir de la vertical hasta la unión de  
la interfaz agua-aceite con la tubería en la parte interna.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCION

### 1.1 Descripción del problema

El flujo contracorriente de dos líquidos inmiscibles en un tubo inclinado es estudiado bajo condiciones de flujo estratificado. La necesidad de modelos matemáticos confiables para predecir el comportamiento del flujo multifásico ha sido el impulso para una extensa investigación experimental en esta área, especialmente para flujos de gas-líquido. Recientemente la industria ha puesto atención en conocer los mecanismos de flujo simultáneo de las mezclas gas/aceite/agua.

La estructura del flujo de la mezcla agua-aceite en tuberías es diferente a la estructura del flujo de la mezcla gas-aceite. La diferencia de la forma de la estructura del flujo es causada principalmente por la gran capacidad de transferencia de momento líquido-líquido y los efectos de flotación. También, la baja cantidad de energía libre en la interfase, permite la formación de pequeñas olas interfaciales y pequeñas gotas dispersas. Por consiguiente, se espera que los sistemas de agua-aceite tengan un comportamiento diferente al sistema gas/aceite (Trallero y cols., 1997).

Las características dinámicas de las mezclas agua-aceite son importantes en aplicaciones tales como: en el diseño de tuberías transportadoras de agua-aceite, pozos horizontales y pozos desviados multilaterales de crudo. Conociendo las características del flujo agua/aceite, pueden usarse en el futuro como una base sólida para entender fenómenos más complejos, como el flujo transitorio de gas/aceite/agua.

Las propiedades del aceite pueden ser muy diversas, las relaciones de viscosidad agua-aceite pueden variar desde más de un millón hasta menos a uno. El aceite puede ser más denso ó menos denso que el agua y este comportamiento reológico puede ser newtoniano ó no-newtoniano. Además, los aceites newtonianos pueden natural ó artificialmente formar emulsión estable, la cual muestra un comportamiento no-Newtoniano.

El flujo contracorriente es un fenómeno muy complejo. Por lo tanto, este estudio está dirigido al análisis del flujo contracorriente de agua-aceite con comportamientos newtonianos y aceites con bajas viscosidades.

El flujo transitorio contracorriente de dos fases líquido-líquido se encuentra en gran número de aplicaciones dentro de la ingeniería. En la industria del petróleo, por ejemplo, las mezclas de crudo y agua son transportadas a las instalaciones de separación por tuberías ascendentes y descendentes. Durante los paros de las líneas de conducción, ya sean programados o por emergencia, se produce separación de las fases agua-aceite y ocurre el flujo transitorio contracorriente. Estas líneas de conducción pueden tener una longitud de hasta 200 km y un diámetro considerable (16 – 36 pg).

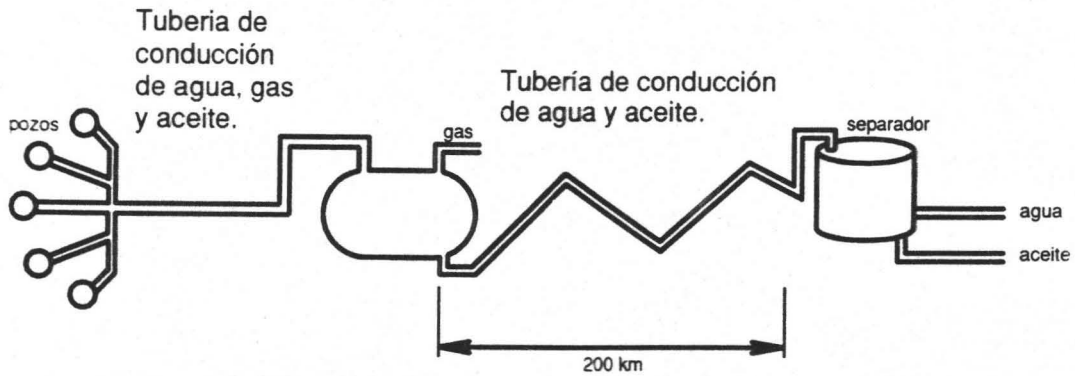


Figura 1.1 Esquema del sistema de producción

Al detenerse el flujo en la línea de conducción de agua y aceite, el agua libre fluye hacia la parte inferior de la tubería donde se acumula (fig. 1.1). El aceite desplazado por el agua libre fluye hacia la parte superior de la tubería, hasta que el sistema queda en reposo. El flujo transitorio de dos fluidos inmiscibles también se presenta en dispositivos atrapadores de taponés (aceite-gas), utilizados para acumular líquidos (condensados y agua libre), producidos en las líneas de conducción durante el transporte del gas húmedo. (Prince y Thomas, 1998).

## 1.2 Descripción del trabajo desarrollado

Este estudio consiste en determinar los perfiles transitorios de colgamiento de agua en la tubería (formas transitorias que toma la interfase en la sección de pruebas), durante el flujo transitorio contracorriente de dos fluidos inmiscibles (agua-aceite) en una tubería ligeramente inclinada ( $<1^\circ$ ) con gasto total nulo.

Para la realización del estudio fue necesario diseñar, construir y poner en operación una instalación experimental de flujo multifásico. La instalación está formada por varios componentes, como: separador, bombas, medidores de flujo y tubería transparente. Los detalles técnicos y características de la instalación se describen en el capítulo 3. Los datos experimentales obtenidos de este estudio se muestran en el capítulo 4 de forma numérica y grafica.

En el capítulo 5 se presenta el modelo desarrollado por Fairuzov (2003) para predecir el comportamiento de flujo contracorriente para flujo líquido-líquido en tuberías horizontales e inclinadas. A partir de este modelo se realizó una predicción de los parámetros de flujo medidos en las pruebas realizadas en la instalación experimental. En el capítulo 6 se comparan los resultados experimentales, con los resultados de la simulación, con el objetivo de estimar la exactitud del modelo de teórico.

En el capítulo 7 se describen las conclusiones y recomendaciones elaboradas después de realizar el presente estudio.

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

A pesar de su importancia, muy poca atención se le ha puesto al flujo de dos fluidos inmiscibles. Masliyah y Shook (1978) desarrollaron un modelo numérico para flujo contracorriente líquido-líquido laminar constante, en un tubo circular inclinado, y obtuvieron una solución analítica para el flujo entre dos placas paralelas infinitas. Zakharov et. al (2000) investigó el flujo contracorriente vertical estacionario de dos líquidos inmiscibles entre placas paralelas. No se han desarrollado estudios previos para investigar el flujo contracorriente transitorio estratificados líquido-líquido.

En estudios citados anteriormente son utilizadas las así llamadas rigurosas (exactas) aproximaciones (Wallis, 1982; Taitel, 1994). Las ecuaciones locales de balance se resuelven asumiendo que la posición de la interfase es conocida. Las soluciones numéricas y analíticas están basadas en aproximaciones para la predicción de los perfiles de velocidades y distribución de esfuerzos cortantes en cada fase. El flujo transitorio de dos fases se observa frecuente en muchas aplicaciones de la ingeniería, con una forma



extremadamente compleja de las interfases, incluso si el patrón de flujo es estratificado. Predecir la distribución de velocidades en cada fase requiere rastrear el movimiento deformable de las interfases, lo cual es una tarea muy difícil (Wallis, 1982; Taitel, 1994) debido a que una gran cantidad de dificultades surgen al resolver las ecuaciones locales de balance (Ishii, 1975). Además, pequeñas ondas (Alcaya et. al., 2000) y mezcla (Trallero, 1995) en la interfases podrían ocurrir durante el flujo simultáneo de dos fluidos inmiscibles en una tubería. Una rigurosa aproximación puede ser ampliamente aplicada a tal patrón de flujo. En suma, se observa que una detallada descripción del flujo ( 2-D or 3-D ) es raramente necesaria en la práctica: una predicción exacta de las velocidades promedio de las fases, perfil del colgamiento del agua, y el tiempo para separar la fase es mucho más importante.

La circulación del agua en el flujo contracorriente de pozos desviados ha sido investigados por Liang-Biao Ouyang (2003) e identificando cinco patrones de flujo para el flujo contracorriente de agua-aceite. Para cada uno de estos patrones propone sus correspondientes mecanismos de ocurrencia, los patrones mencionados son: flujo contracorriente estratificado, flujo contracorriente estratificado con movimiento ascendente de gotas de agua, flujo contracorriente estratificado con fase de agua ascendente, flujo contracorriente con flujo intermitente, flujo contracorriente con flujo disperso de gotas. Dos criterios prácticos apoyados en los mecanismos de transporte de la capa de líquido y las gotas de líquido han sido desarrollados para determinar la incidencia del flujo contracorriente agua-aceite en pozos multilaterales o desviados. El criterio también puede ser aplicado para determinar las condiciones de fuerzas ascendentes del líquido para pozos de gas. La desviación del pozos, tamaño del pozo y densidad del aceite son los tres principales factores que afectan al incidencia del flujo contracorriente de agua-aceite. Pozos de diámetro pequeño, con grandes desviaciones ó fases de aceite muy densas,

requieren un flujo por debajo de la tasa mínima para evitar la aparición del flujo contracorriente.

Los efectos de inclinación sobre las características de flujo laminar contracorriente líquido-líquido son investigadas por Ulman y M. Zamir et al. (2003) tanto teóricamente como experimentalmente. Resultados experimentales muestran que en tuberías con ligeras inclinaciones fuera de la vertical, las fases tienden a segregarse y el patrón principal de flujo en tuberías inclinadas, es flujo estratificado. Además, para condiciones controladas de operación, existen dos modos estables de configuraciones que difieren de sitio del colgamiento, perfiles de velocidad y la caída de presión, y ambas pueden coexistir en la columna. La aplicación del modelo de dos fluidos y del modelo de dos platos para la predicción de las características del flujo contracorriente es examinado. Ambos modelos predicen la existencia de dos modos por los que pueden ser observados los colgamientos asociados en la columna. El modelo de dos platos confirma las conclusiones experimentales acerca del flujo descendente, que es una característica propia del flujo contracorriente. Las conclusiones de este estudio son aplicables para avanzar en la obtención del caudal de la fase de transición de las columnas de extracción.

En el trabajo de Fairuzov et al. (2003) se muestra un modelo de dos fluidos para flujo nulo neto transitorio. Una nueva formulación de la ecuación combinada de balance de momento es propuesta para calcular el efecto del gradiente de colgamiento del agua.

El flujo contracorriente transitorio de dos líquidos inmiscibles en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas son estudiadas de forma numérica. El modelo de dos fluido en una dimensión de dos fases fue usado para realizar la simulación numérica del fluido. Se propuso una nueva formulación de la ecuación de momento combinado para modelar el flujo de dos fases impulsadas por gravedad en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas. Los dos mecanismos fueron investigados separadamente. Se

encontró que la redistribución de fases en los sistemas liquido-liquido es controlado por la propagación de las olas de colgamiento. La velocidad de la propagación de la ola tiene un efecto importante sobre el perfil de colgamiento transitorio. La distribución final de las fases en la tubería esta determinada por la geometría de la tubería y por las características de cada líquido. Esta investigación contribuye en mejorar los conocimientos del los flujos contracorrientes transitorios en dos fases liquido-liquido en tuberías.

La revisión de la literatura hecha en el presente capítulo muestra que no hay trabajos experimentales realizados anteriormente por algún investigador en relación al flujo transitorio contracorriente de dos líquidos inmiscibles. Por lo que este trabajo consiste en obtener datos experimentales.

## **CAPÍTULO 3**

# **DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL**

### **3.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL**

Para realizar el estudio experimental de flujo transitorio contracorriente de dos fluidos inmiscibles en una tubería ligeramente inclinada, se construyó una instalación experimental de flujo multifásico en el Instituto de ingeniería de la UNAM.

Un esquema simplificado de la instalación experimental de flujo multifásico se muestra en la figura. 3.1.

Los elementos principales de la instalación son:

- Fluidos de trabajo
- Sección de prueba
- Separador
- Tanques
- Bombas
- Sistema de adquisición de datos

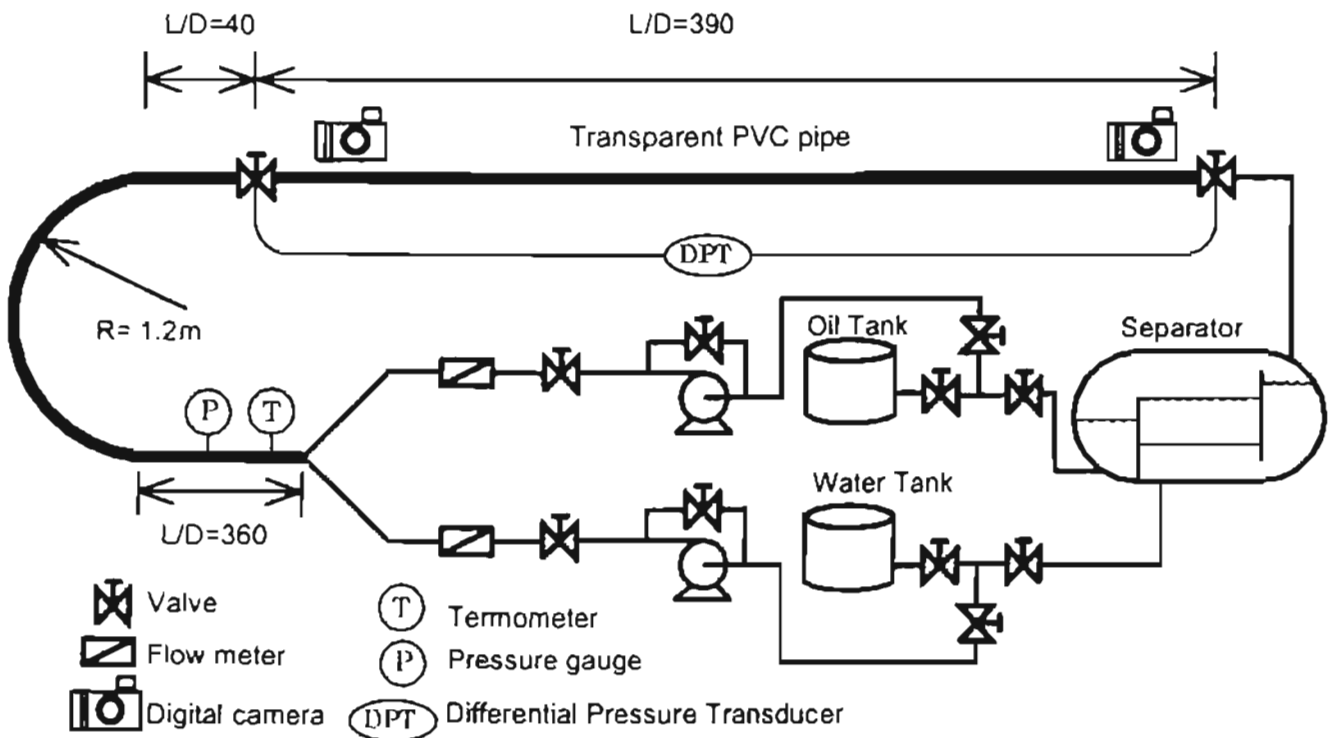


Figura. 3.1 Esquema simplificado de la instalación experimental de flujo multifásico

En las figuras 3.2 y 3.3 se pueden observar los elementos que componen la instalación experimental. El área ocupada por el circuito es de 40m x 6m. Todos los elementos de la figura 3.2 y 3.3 se encuentran a escala con el objeto de apreciar las dimensiones del circuito y sus componentes.

Para observar un fenómeno de flujo multifásico agua-aceite en la tubería de prueba, se encienden las bombas, las cuales aportan un gasto constante de agua y aceite a la instalación. Los gastos de los líquidos se unen en la unión tipo “ Y “, para ser conducidos a la sección de pruebas transparente (fig. 3.3). Se procede a regular el gasto con las válvulas de estrangulamiento y con los pasos alternos que tienen las bombas, hasta que los medidores de flujo muestran los gastos requeridos para realizar la prueba del fenómeno de flujo multifásico. Cuando los líquidos salen de la sección transparente de pruebas, los líquidos entran al separador, en donde son separados. Estos líquidos pueden ser almacenados en tanques ó conducidos nuevamente a la sección transparente de pruebas en un ciclo continuo.

Una de las dos formas de operar la instalación, es hacerla funcionar solamente con los volúmenes de líquidos almacenados en los tanques. Esto se realiza cerrando las válvulas que comunican el separador con la succión de la bomba y cerrando las válvulas que unen los tanques de almacenamiento con la succión de la bomba (fig. 3.3). Al cerrar las válvulas que comunican el separador con la succión de las bombas, los líquidos se almacenan en el separador, por lo que se realiza una completa separación de la mezcla agua-aceite, al dejar reposar un largo tiempo los líquidos. Después de un periodo de separación largo, se abre la válvula que une al tanque de almacenamiento con la succión de la bomba y se abre la válvula que une el separador y la succión de la bomba. Debido a que el separador se encuentra a 1.7m del suelo (fig. 3.2), los líquidos del separador fluirán por gravedad a los

tanques de almacenamiento. Cuando los líquidos estén en los tanques de almacenamiento se puede iniciar la siguiente prueba ó realizar operaciones de mantenimiento sobre la instalación.

La otra forma de operar la instalación, es hacerla funcionar continuamente. Inicialmente se tienen los líquidos en los tanques, por lo que se cierran las válvulas que unen la succión de la bomba con el separador y se abren las válvulas que unen la succión de la bomba con los tanques de almacenamiento y se encienden las bombas, así los líquidos fluirán por la sección transparente de pruebas y se inicia el llenado del separador con agua y aceite. Antes de que se vacíen los tanques de almacenamiento se cierran las válvulas que unen la succión de las bombas con los tanques de almacenamiento y se abren las válvulas que unen la succión de las bombas con el tanque separador, teniendo así un flujo continuo en la instalación experimental.

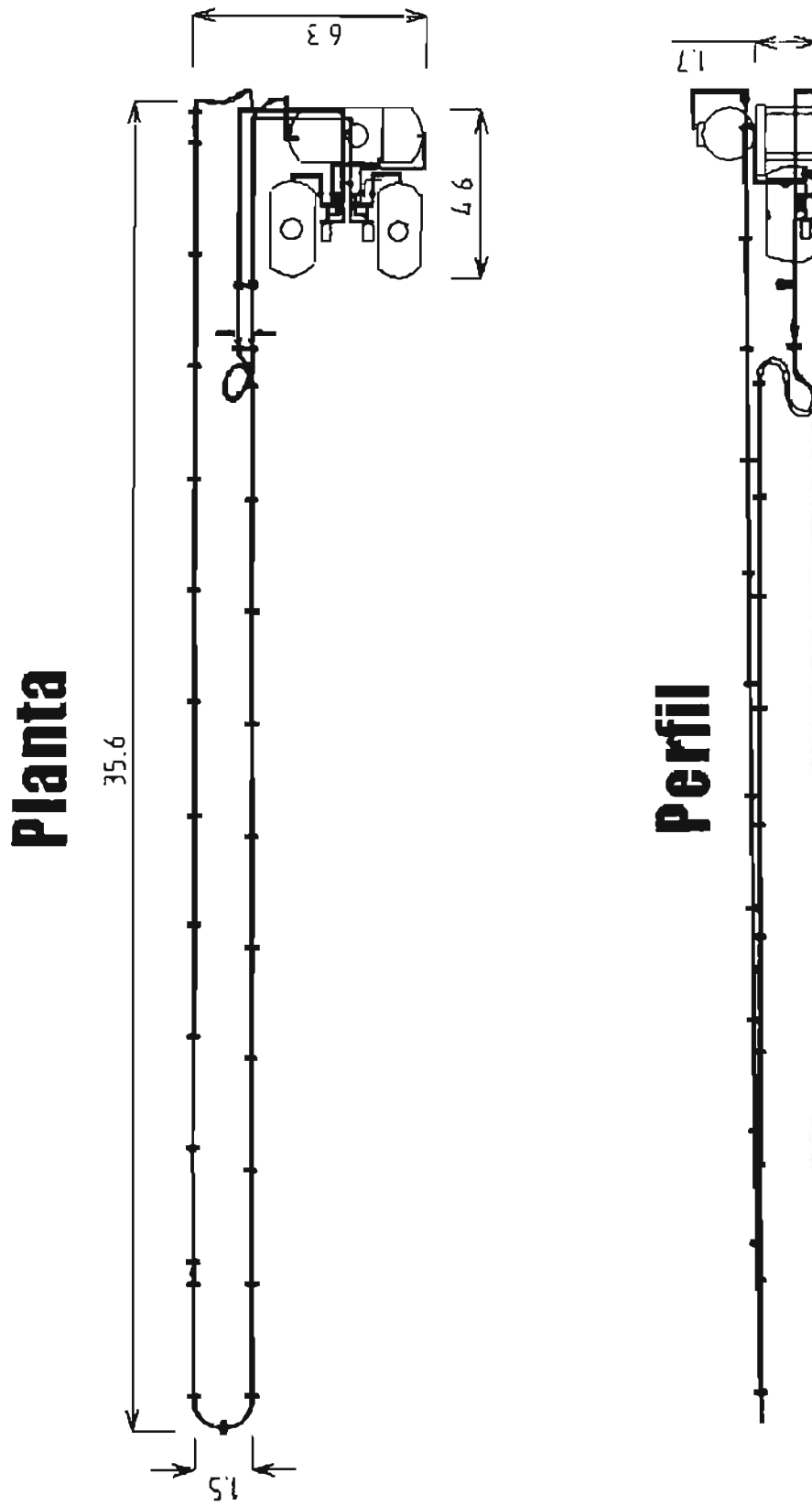


Figura 3.2 Dibujo a escala de la planta y perfil del circuito experimental de flujo multifásico acotaciones en metros.



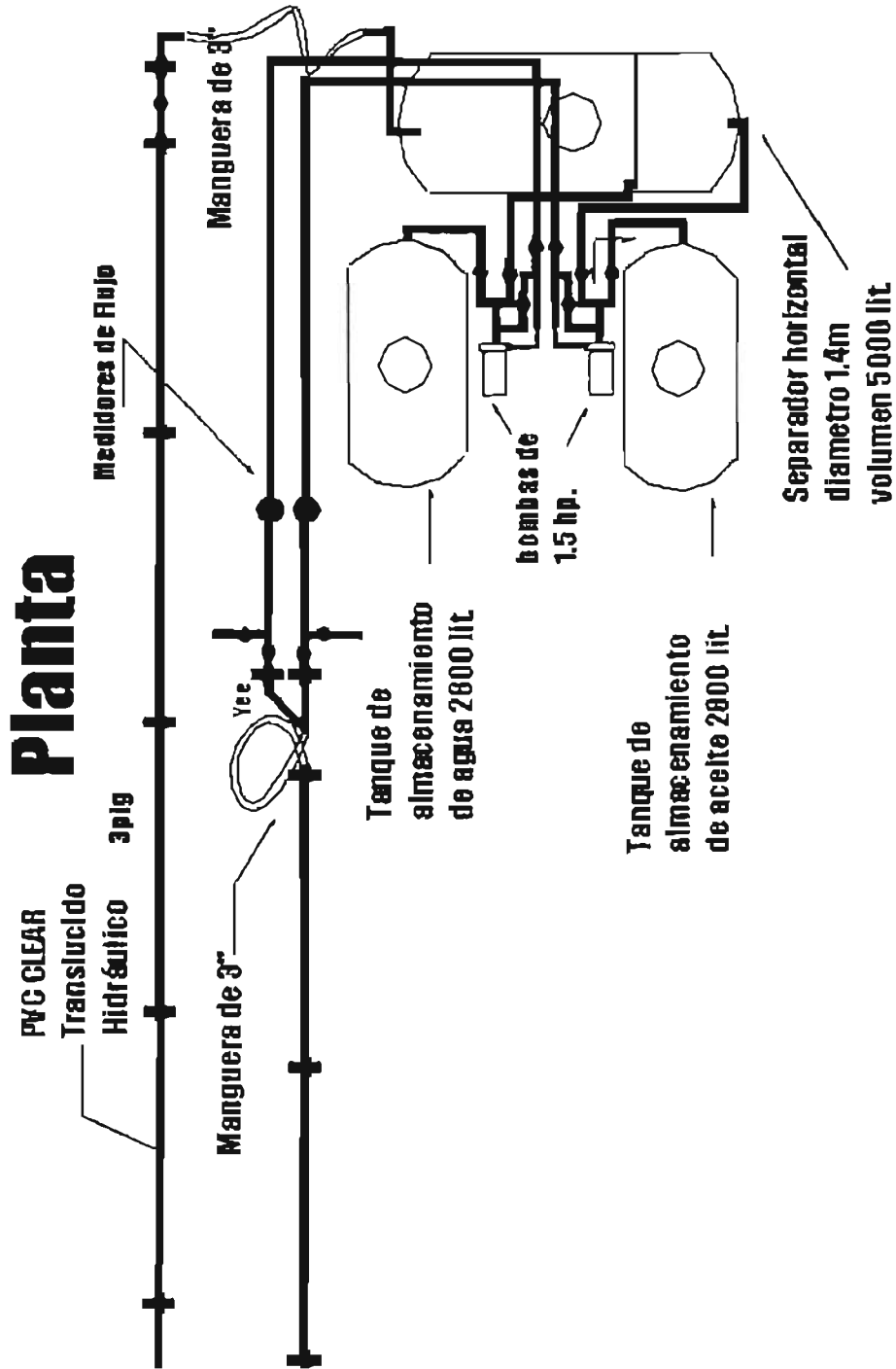


Figura 3.3 Detalle de la planta del circuito experimental de flujo multifásico

Para una la fácil operación de los niveles de los líquidos en el separador, se instalaron los tanques de almacenamiento (fig. 3.3) junto al separador, las bombas y el conjunto de válvulas necesarias para la operación de los fluidos en los tanques de almacenamiento.

Para lograr el gasto requerido, se tienen válvulas para estrangular el flujo (fig. 3.4 y foto 3.1), al inicio de la sección de prueba y un paso alterno, (fig. 3.5 y foto 3.2) que une la descarga y toma de la bomba, que se puede abrir o cerrar según sea necesario. La velocidad máxima de flujo alcanzada en la sección de pruebas es de 2 m/s. Con el uso del paso alterno, además de lograr controlar el gasto de fluido, se puede regular la presión existente en la sección de la tubería que se encuentra aguas abajo de las válvulas de estrangulamiento y evitar así, y la sobrepresión en cualquier parte de la instalación por algún cierre imprevisto en la sección de pruebas.

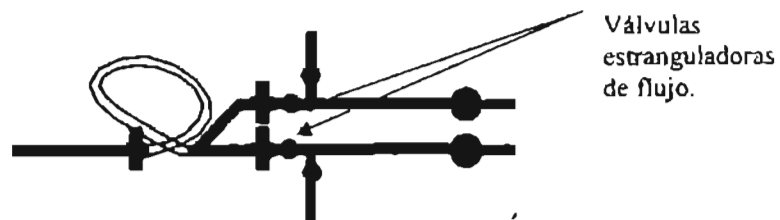


Figura 3.4 Esquema de la posición de las válvulas para estrangular los flujos

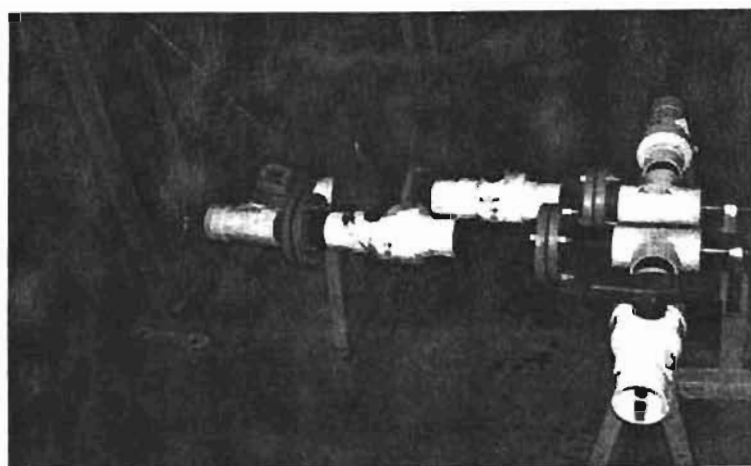


Foto 3.1 Válvulas estranguladoras de flujo

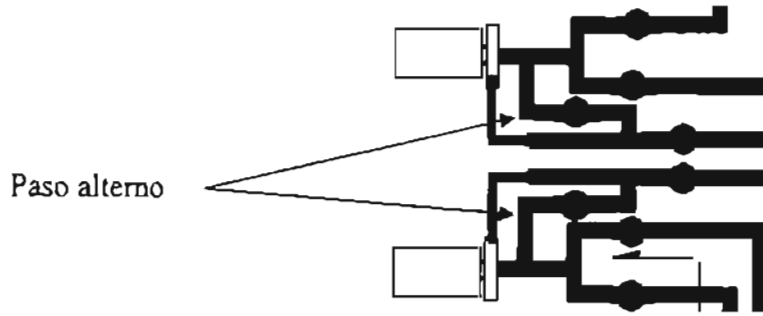


Figura 3.5 Esquema de funcionamiento del paso alterno

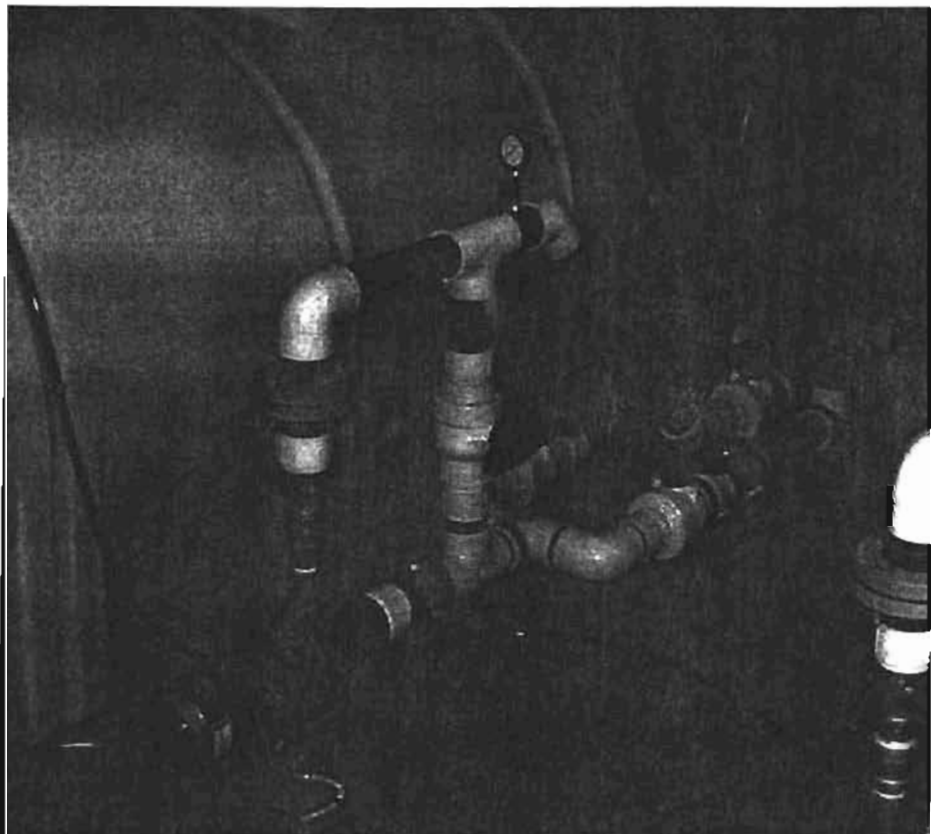


Foto.3.2 Paso alterno construido en la instalación.

### 3.1.1 Selección del fluido de trabajo

Para la selección de los líquidos de trabajo, fue necesario investigar los diferentes tipos de aceites minerales que cumplieran con nuestras necesidades de operación, como: baja viscosidad, baja densidad, no flamable, económico, totalmente inocuo al contacto con la piel, transparencia y que no formen una emulsión estable al mezclarse con el agua.

Se analizaron las características de 8 muestras de aceites, los cuales fueron Propar 100, Propar 2500, Propar 150, Cristal 90, Cristal 50, diesel, aceite automotriz Quaker y queroseno.

Todos estos aceites se mezclaron con agua en un cilindro y se sometieron a agitación. Se observó la rapidez para separarse del agua, claridad y la afinidad nula para formar emulsión estable. A partir de estas pruebas se escogió el aceite Cristal 50 por cumplir con las características requeridas para la presente investigación. Este aceite es muy ligero con una densidad de  $0.84 \pm 0.003 \text{ gr/cm}^3$  (37° API), una viscosidad de 6.14cp a 16°C. y 5.00 cp a 25°C y una tensión interfacial  $36 \pm 1 \text{ dinas/cm}$ . El aceite cristal 50 seleccionado se le agregó colorante de color rojo para facilitar la observación de la interfase agua-aceite dentro de la sección de pruebas.

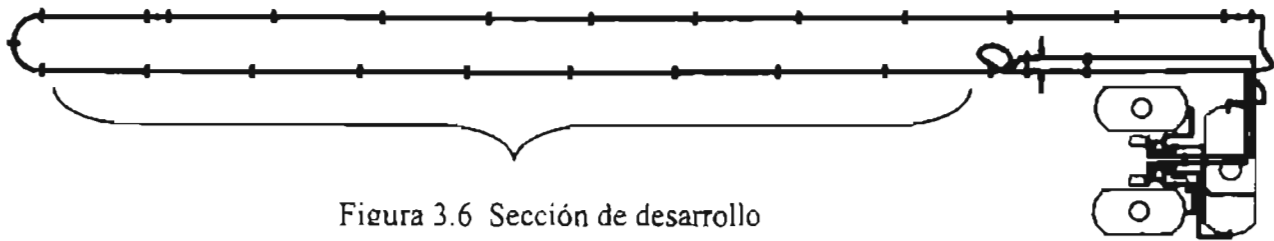
Otro fluido que se maneja en la instalación experimental es agua, la cual tiene una densidad de  $1.037 \pm 0.003 \text{ gr/cm}^3$ ; y una viscosidad de 1.002 cp.

### 3.1.2 Sección de prueba

#### Sección de desarrollo.

Uno de los elementos de la instalación es la sección donde se desarrolla el patrón de flujo de los fluidos. Esta sección sirve para obtener flujo completamente desarrollado en la sección de prueba.

La sección de desarrollo inicia después de la “Y”, y termina después de la media circunferencia, como se muestra en la fig. 3.6, con una longitud de 24m hecha con tubos de PVC CLEAR HARVEL translúcido de 3 plg. La sección está armada con tubos de 3m. los cuales están unidos con bridas para un fácil mantenimiento.



### Sección de prueba

El siguiente componente de la instalación experimental, es la sección de pruebas (fig 3.7), en donde se estudia el comportamiento de la interfaz liquido-liquido y se toman mediciones. Esta sección tiene una longitud de 30m de tubería hidráulica de PVC CLEAR HARVEL transparente, cédula 60 y diámetro de 3 plg. La sección está formada por tubos de 3m con bridas de PVC en sus extremos. Este método de ensamble se eligió con el objetivo de modificar fácilmente la configuración de la tubería, en función de las necesidades de investigación, como puede ser, agregar válvulas, codos o pendientes. Algunas de las configuraciones que puede adoptar la tubería se muestran en la figura 3.8.

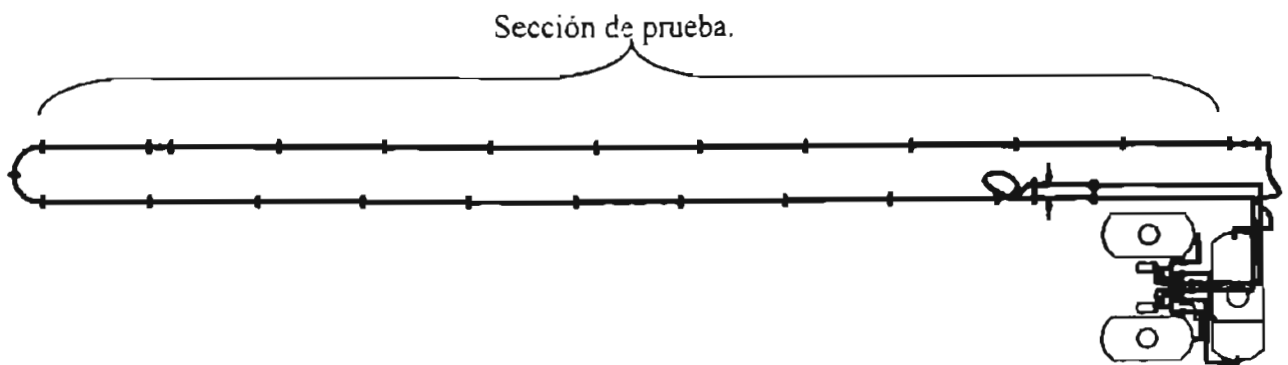


Figura 3.7 Sección de prueba

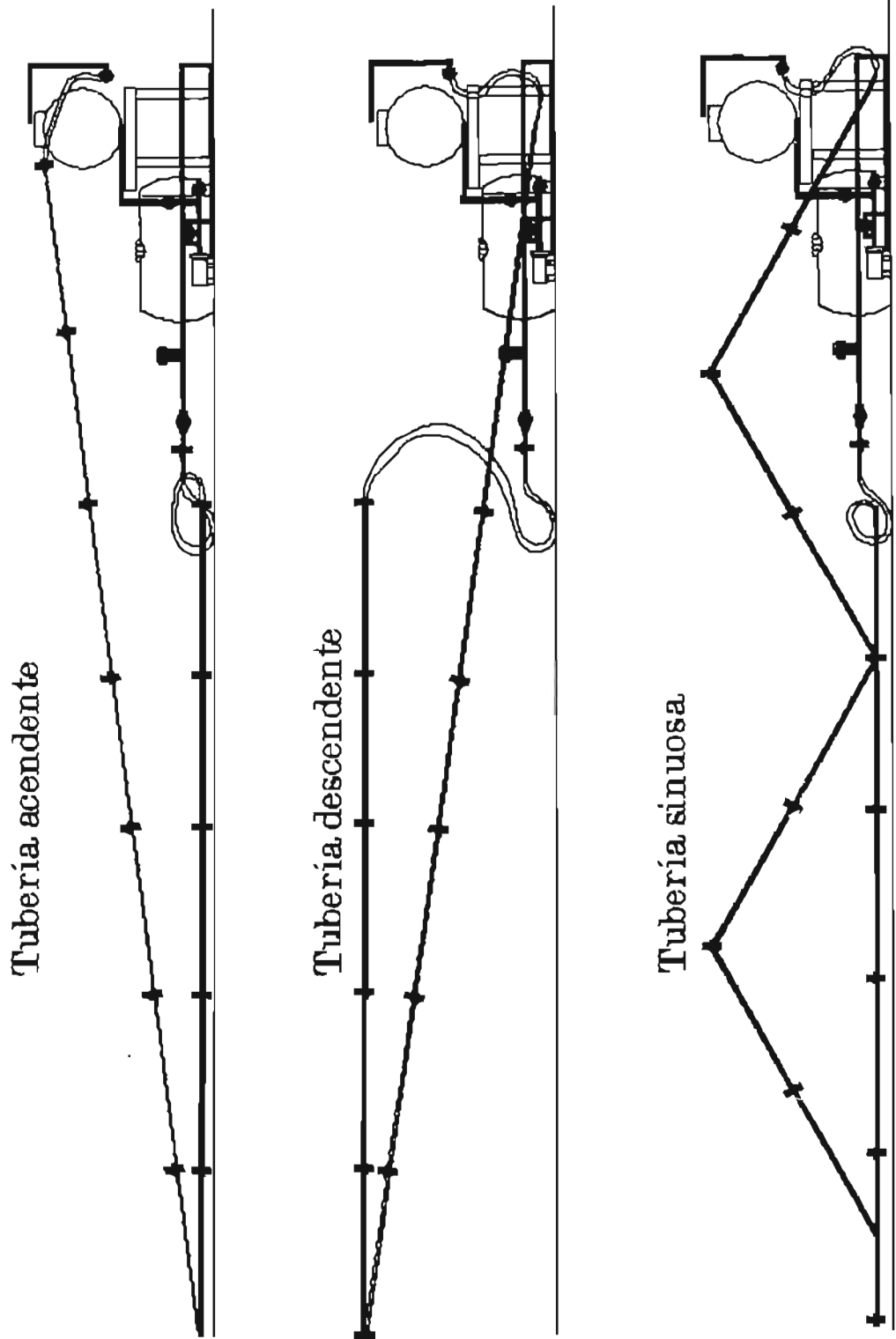


Figura 3.8 Diferentes configuraciones que puede adoptar el circuito

Soportes de la tubería

Para lograr modificar la inclinación de la tubería se tiene un sistema que la sostiene y la eleva según sea necesario. Este sistema está integrado por unas abrazaderas de madera con unos cojinetes de hule para sujetar la tubería de PVC. Estos elementos a su vez son soportados por un marco de acero que tiene una altura de 2.5 m y un ancho de 0.3 m como se puede ver en la figura 3.9.

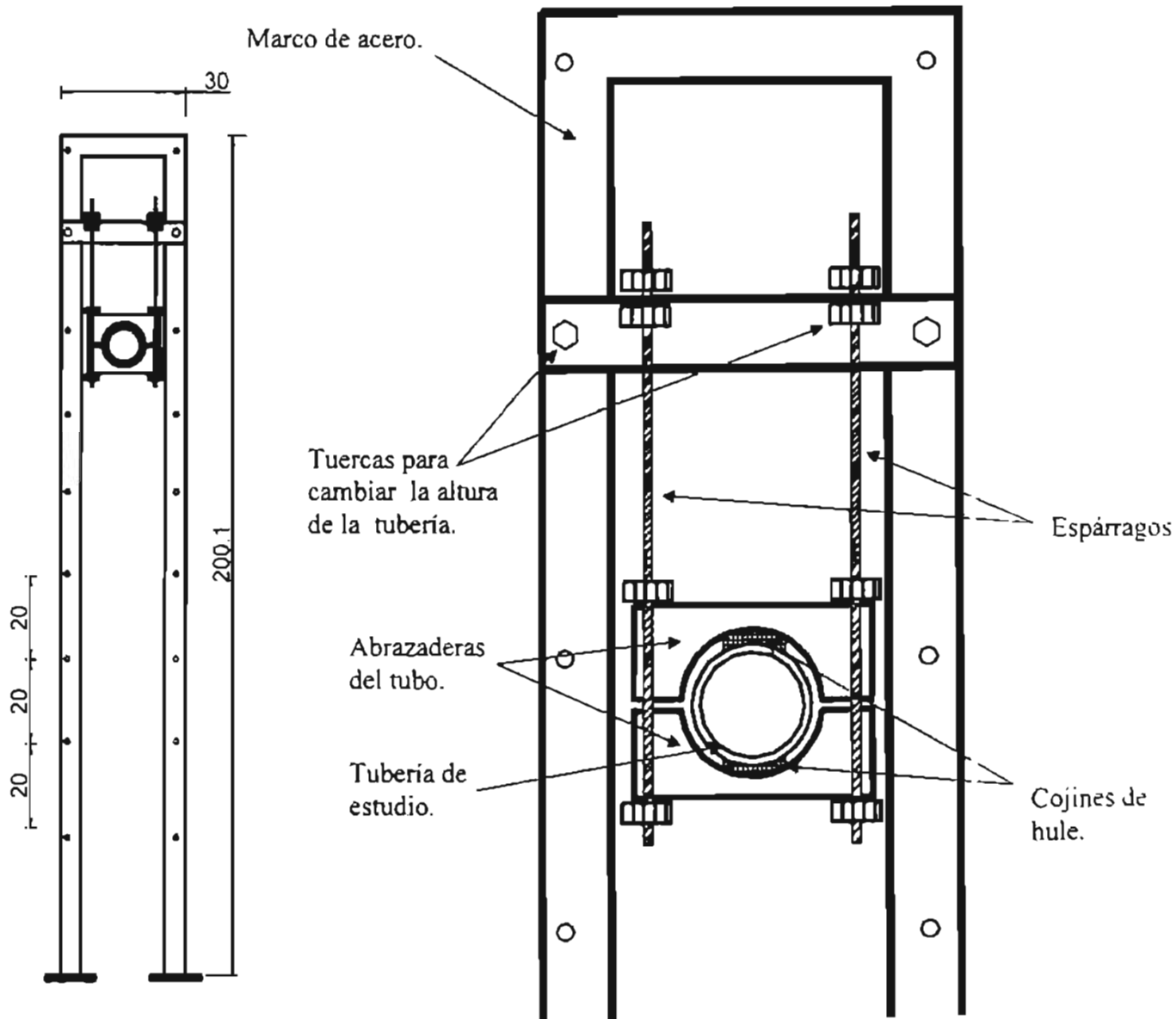


Figura 3.9 Soportes de la tubería del circuito



Se utilizaron 50 marcos de acero anclados al suelo y están unidos en la parte superior, mediante un perfil de acero, para aumentar la rigidez del conjunto de marcos como se muestra en la foto 3.3.

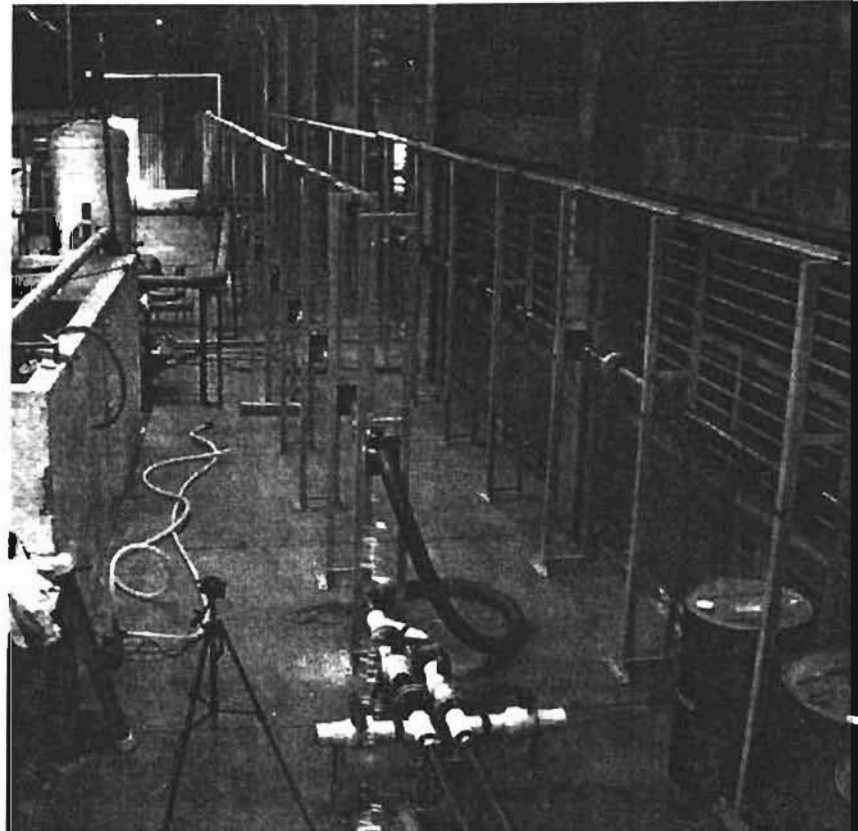


Foto. 3.3 Marcos de acero del circuito

La sección de pruebas se puede colocar en varios ángulos, que van desde  $\pm 10^\circ$  de inclinación como se muestra en la figura 3.8.

### 3.1.3 Separador

El separador que se utilizó, es un tanque de polietileno de alta densidad tipo industrial marca ROTOPLAST, que se modificó para que funcionara como separador de agua-aceite.

Las modificaciones que se le hicieron fueron, agregarle un vertedor de 90 cm de altura en el extremo derecho para separar el aceite del agua, se le colocó una mampara de 1 m de altura en el extremo izquierdo para atenuar la turbulencia de los líquidos a la entrada del separador, tal como se muestra en la figura (fig. 3.10). El separador tiene una capacidad de 5000 l, una longitud de 3.6 m y un diámetro de 1.4 m.

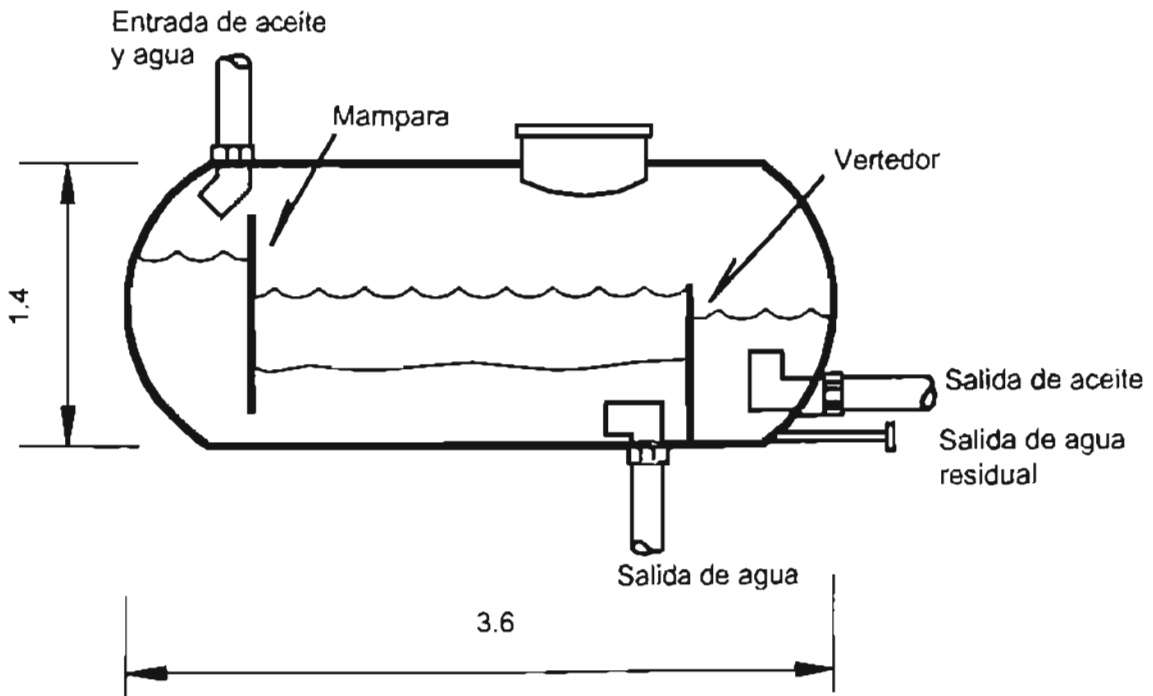


Figura 3.10 Características internas del separador

En la parte inferior derecha se le colocó un drenaje de agua residual (fig. 3.10), para sacar el agua que se precipita al fondo del tanque en la sección de aceite después de un largo periodo de operación de la instalación. Esta salida de agua está conectada al tanque de agua y controlada por una válvula de paso.

El separador se encuentra colocado sobre una plataforma de concreto que tiene una altura de 1.7m como se aprecia en la fig 3.11 y en la foto 3.4.



Figura 3.11 Separador colocado a 1.7 m del suelo

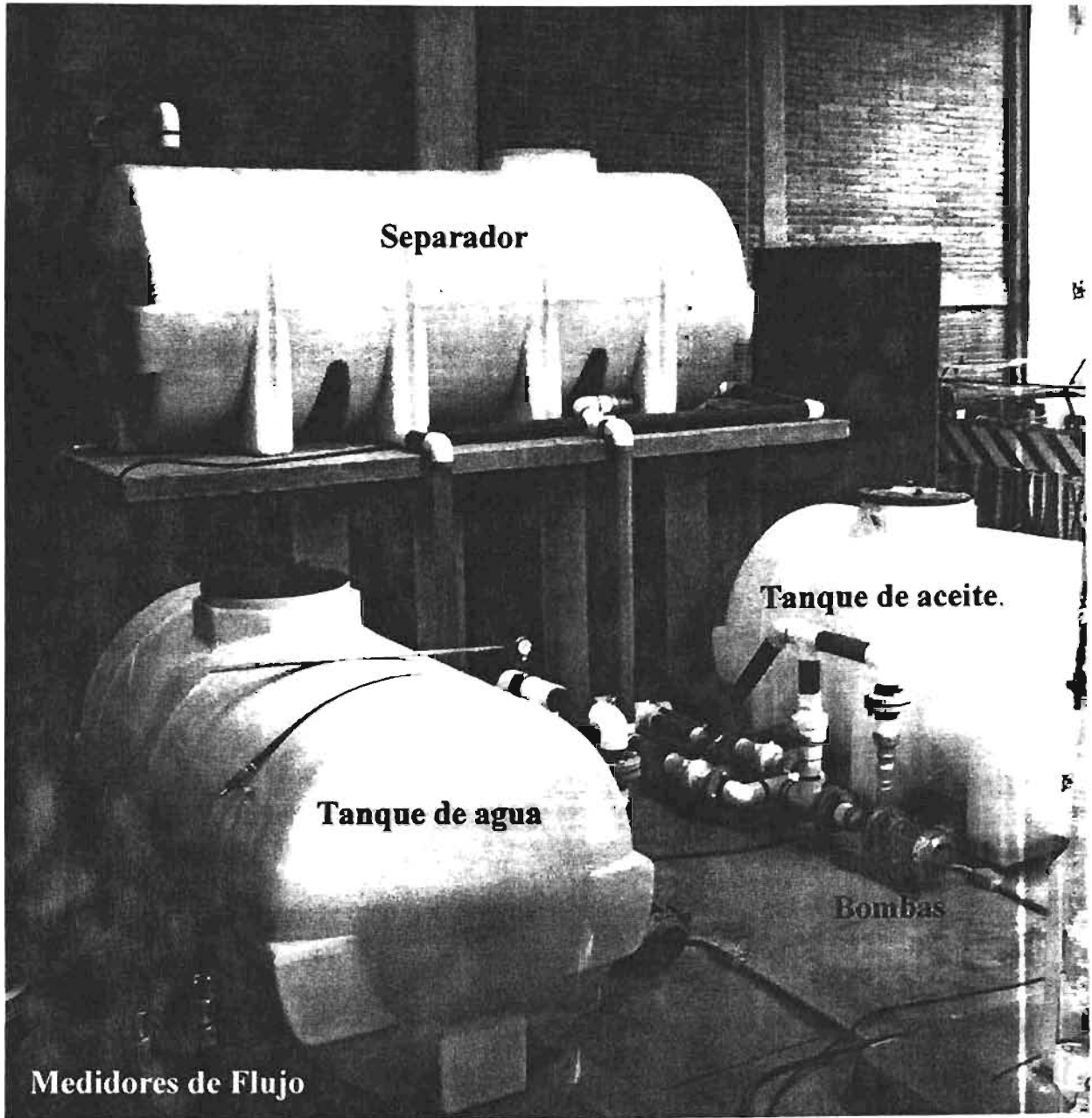


Foto 3.4 Equipos instalados para el manejo de los líquidos

### 3.1.4 Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento se utilizaron para el manejo de los fluidos durante las reparaciones, modificaciones, y limpieza de la instalación. Estos tanques están hechos de polietileno de alta densidad, tipo industrial, marca ROTOPLAST. Los tanques tienen una longitud de 2.6 m, diámetro de 1.2 m y la capacidad es de 2800 l.

Al tanque de almacenamiento de aceite, se le colocó una tubería de 0.5 plg en la parte inferior izquierda, para drenar el agua que se precipita al fondo del tanque (fig.3.12).

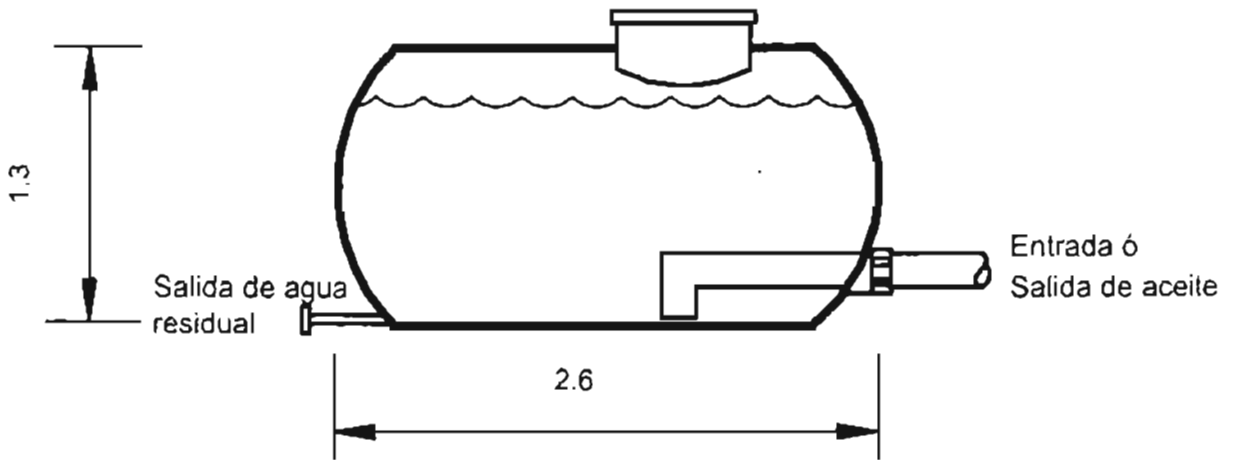


Figura 3.12 Tanque para almacenamiento de aceite

Al tanque de agua se le colocó en la parte superior una manguera que descarga el agua que se precipita en la sección de aceite del separador (fig 3.13).

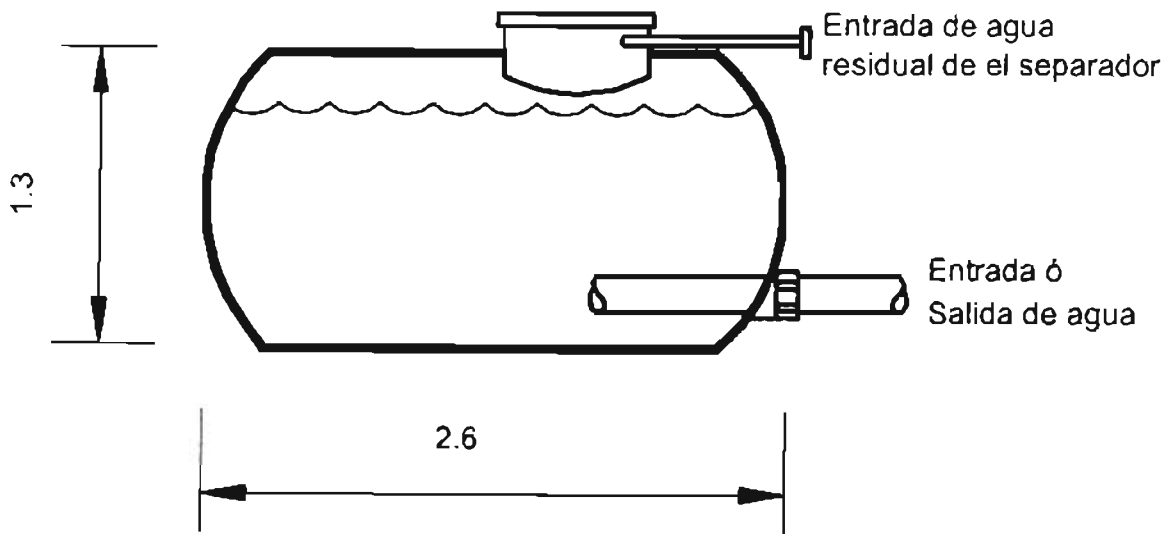


Figura 3.13 Tanque para almacenamiento de agua

### 3.1.5 Bombas

Las bombas que se utilizaron tienen un impulsor centrífugo horizontal de 25 cm de diámetro marca BARNES, el cual está adaptado directamente a un motor eléctrico trifásico alimentado con corriente de 220volts. El motor eléctrico entrega una potencia de 1.5cp a 3500 rpm. Estas bombas sostienen un gasto 300 l/m con una carga de 11 m.

### 3.1.6 Sistema de adquisición de datos

Se utilizaron medidores +GS+SIGNET+2540 (fig 3.14), tipo molinete para determinar el gasto de cada uno de los fluidos que entran al circuito, junto con los transductores de señal del molinete. El transductor es un procesador que transforma la

señal del molinete en una serie de dígitos que permite leer el gasto en una pantalla de cristal líquido (fig. 3.14).

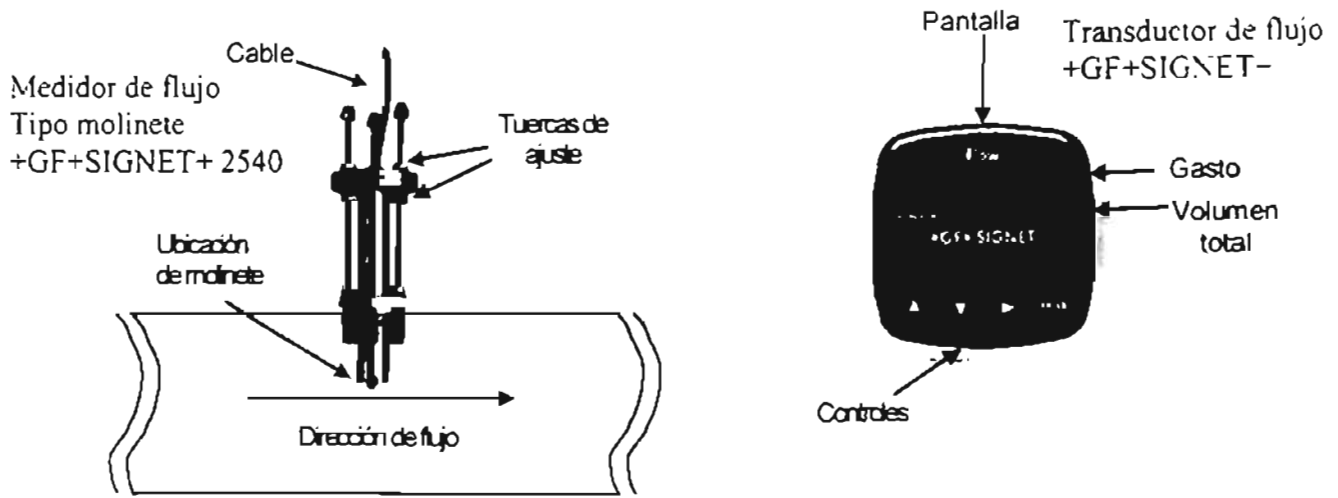


Figura 3.14 Equipo para la adquisición de datos

Otro de los instrumentos utilizados fue una cámara digital profesional Olympus Camedia E-20N con una resolución de 5 megapíxeles, utilizada para obtener imágenes de los patrones de flujo que se presentan dentro de la sección de pruebas a diferentes combinaciones de gastos y pendiente en la sección de pruebas.

### 3.1.7 Calibración e instalación de los medidores de flujo

Los medidores de flujo, deben de cumplir con algunos requerimientos de instalación como: posición en la tubería, altura del molinete dentro de la tubería y calibración (Fig. 3.15 y 3.16). El medidor de flujo se instala en una tubería de tal manera que aguas arriba del medidor exista una longitud de tubería equivalente a 50 diámetros internos y aguas abajo del medidor haya una longitud equivalente a 5 diámetros internos de la tubería. El medidor

se coloca en la posición indicada, debido a que al inicio de la tubería donde se instala el medidor hay una válvula check.

El sensor debe estar a una altura  $H_m$  tomando como base el diámetro externo ( $d_e$ ) de la tubería, como se muestra en la Fig. 3.16 y recomienda el manual del proveedor, que el cálculo de  $H_m$  se realizó con la expresión 3.1.

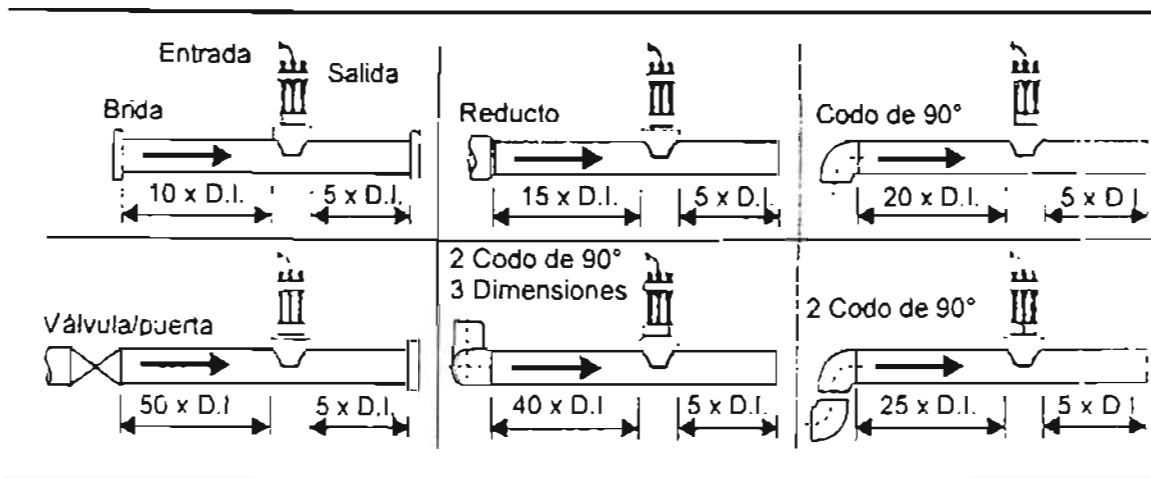


Fig. 3.15 Recomendaciones del fabricante para la instalación del sensor de flujo

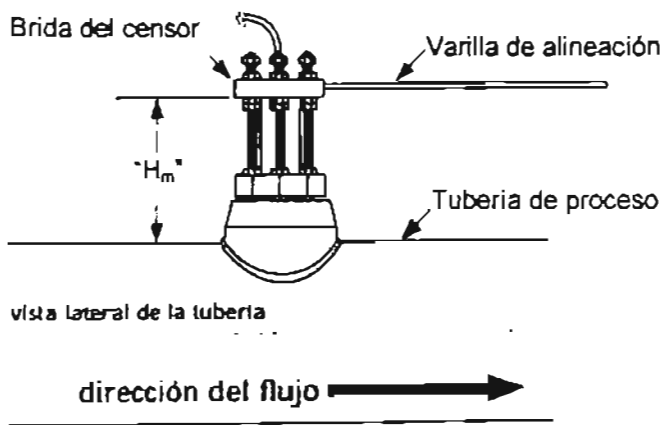


Fig. 3.16 Altura " $H_m$ " del medidor de flujo



$$H_m = 5.23 - \text{espesor de pared de la tubería} - (0.10 * d_i), \quad (3.1)$$

Satisfecha la condición geométrica y obtenida el valor de  $H_m$  se procede a la instalación del transductor de flujo (Fig. 3.17).

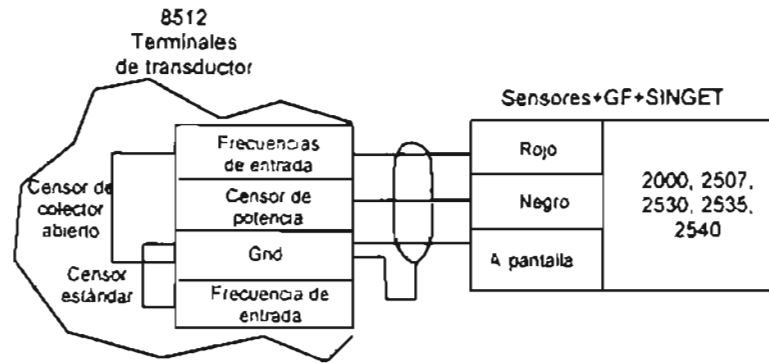


Fig. 3.17 Instalación de transductor censon

Al transductor de flujo se le debe ingresar una constante (K) para poder leer los valores directos en gpm o lts/s, la constante se toma de una tabla proporcionada para manejar agua, de acuerdo al tipo de cedula y material de la tubería (tabla 3.1 proporcionada por el fabricante). Podemos observar en la tabla 3.1, que para una tubería de plástico con 3 pg de diámetro y cedula 80 el factor K es de 11.59 (pulsos/litro).

Al medidor de flujo que maneja aceite se le modifico la constante K, con el objetivo de que efectúe una correcta medición. La modificación de la constante K consistió en realizar comparaciones de los gastos medidos contra gastos aforados e ir modificando la constante hasta que los gastos fueron iguales. Los aforos se realizaron en un tanque de 200 l aguas abajo de los medidores flujo (Fig. 3.18 y foto 3.5)

Tabla 3.1 Valores de la constante K proporcionada por el fabricante para tubos de plástico.

SCH 40 Tubería plástica según ASTM-D-1785

PIPE SIZE	K-Factor	K-Factor	A-Factor	A-Factor
	PULSES/ U.S. GAL	PULSES/ LITER	U.S. GPM/HZ	LPM/HZ
1-1/2 in.	139.850	36.948	0.429	1.624
2 in.	82.968	21.920	0.723	2.737
2-1/2 in.	62.194	15.903	0.997	3.773
3 in.	39.513	10.439	1.518	5.747
3-1/2 in.	29.295	7.740	2.048	7.752
4 in.	22.565	5.962	2.659	10.064
5 in.	14.308	3.780	4.193	15.872
6 in.	9.8530	2.606	6.083	23.025
8 in.	5.6400	1.490	10.638	40.266
10 in.	3.4476	0.911	17.403	65.872
12 in.	2.3786	0.628	25.225	95.476

SCH 80 Tubería plástica según ASTM-D-1785

PIPE SIZE	K-Factor	K-Factor	A-Factor	A-Factor
	PULSES/ U.S. GAL	PULSES/ LITER	U.S. GPM/HZ	LPM/HZ
1-1/2 in.	162.290	42.877	0.370	1.399
2 in.	97.186	25.677	0.617	2.337
2-1/2 in.	68.559	18.113	0.875	3.312
3 in.	43.870	11.590	1.368	5.177
3-1/2 in.	32.831	8.674	1.828	6.917
4 in.	25.250	6.671	2.376	8.994
5 in.	15.835	4.184	3.789	14.342
6 in.	11.041	2.917	5.434	20.569
8 in.	6.2877	1.661	9.542	36.118
10 in.	3.8529	1.018	15.573	58.943
12 in.	2.6407	0.698	22.721	86.000



Si el número de serie en su sensor parece estar dividido en esta paginación:



Si el número de serie en su sensor parece estar dividido en esta paginación por 0.9253:

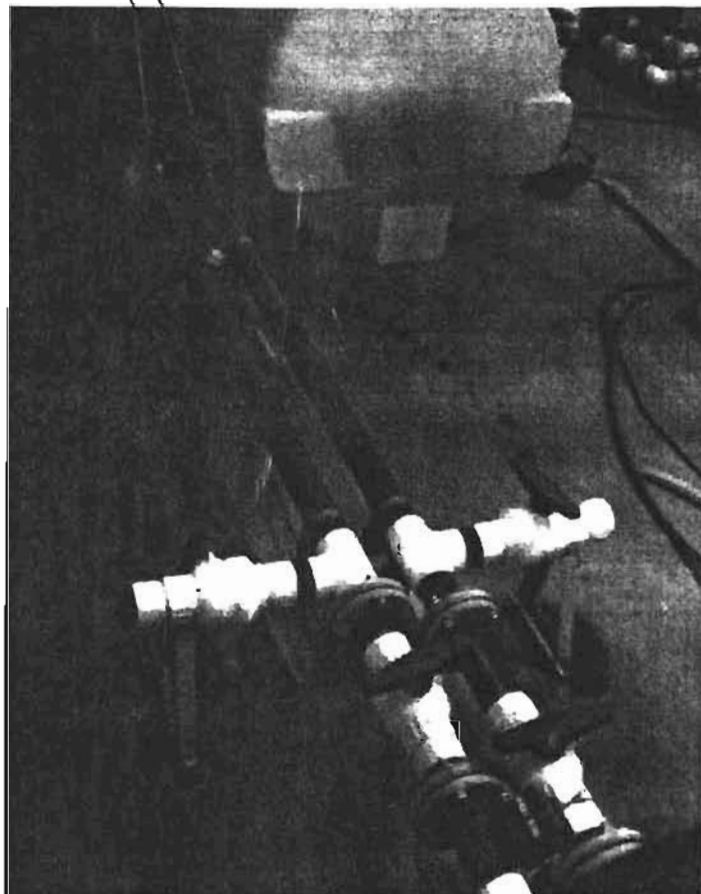
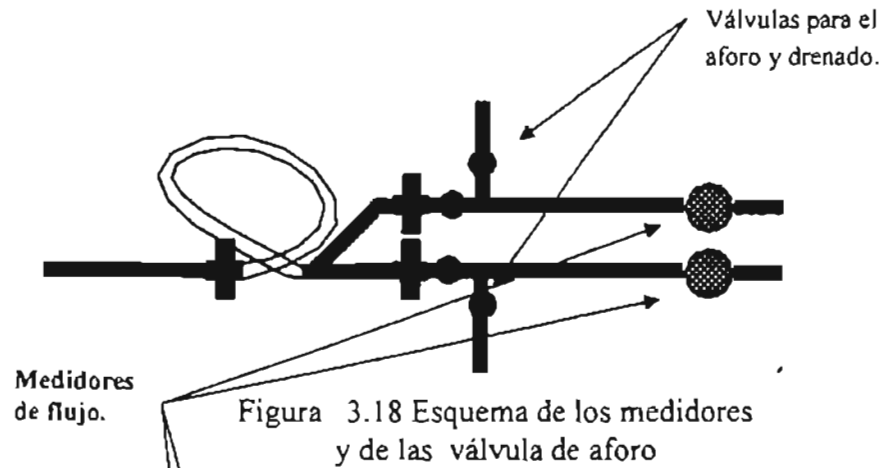


Foto.3.5 Medidores de flujo y válvulas para aforo.

## 3.2 ANALISIS DE INCERTIDUMBRE

En la presente sección se muestra la estimación de la incertidumbre para los parámetros medidos, como: gastos de aceite, gastos de agua y espesor de la capa de agua. Con base al espesor de la capa de agua, se determino el colgamiento del líquido

### 3.2.1 Exactitud, precisión y error

Algunas veces hay considerable confusión sobre el significado y la diferencia entre los términos exactitud y precisión. A esta confusión se añade el que en la mayoría de los diccionarios se describan esos términos con el mismo significado. Sin embargo, exactitud y precisión tienen significados distintos, esta diferencia es importante para expresar los resultados de las mediciones.

La exactitud de una medición es el grado de aproximación al valor real. El grado de exactitud se expresa en términos de error. El error es la diferencia entre un valor medido (o calculado) y el valor "real". Por supuesto, en la mayoría de los casos no conocemos el valor "real", pues si así fuera no habría razón de efectuar una medición y una mejor medición implica mayor exactitud o menor error.

La precisión se refiere al grado de reproductibilidad de la medición. Esto es, la precisión es una medida de la "dispersión" del error de los resultados de una serie de mediciones hechas intentando determinar un valor real.

Puesto que tanto la exactitud como la precisión dependen del error, analicemos este último más de cerca. Hay en términos generales dos tipos básicos de errores de medición a saber. errores sistemáticos y errores aleatorios. Los errores sistemáticos se asocian con el

instrumento de medición particular o la técnica de medición que se esté empleando. Por ejemplo suponga que una medida estándar de 1 gm empleada en una balanza es generalmente mayor de 1 gm, lo que implica que la pesa que emplea la balanza no se ha puesto a cero adecuadamente o que ambas no son del peso de modo que pesa un poco más. El error inducido a estas condiciones es entonces consistente o sistemático en un "sentido". En general la exactitud de una medición depende de que tan bien podamos controlar los valores sistemáticos.

Los errores aleatorios son producidos por variables impredecibles y desconocidas en las situaciones de medición. Por ejemplo, un observador puede inadvertidamente cometer un error al estimar el valor de la división más pequeña del instrumento, o vibración mecánica de algún tipo pueden provocar una medida incorrecta del instrumento. Tales errores ocurren frecuentemente. En general, la precisión de una serie de mediciones depende de que tan bien puedan evitarse los errores aleatorios.

### 3.2.2 Cifras significativas

Cuando se lee un valor de una medición en la escala calibrada de un instrumento dicha lectura solo se hace hasta cierta cantidad de cifras o dígitos. El grado de certidumbre de una medición se expresa por la forma en que el resultado se escribe o informa en cifras significativas.

En general por definición: las cifras significativas de un valor medido incluyen todos los dígitos que pueden leerse directamente en la escala de un instrumento de medición más un dígito dudoso o estimado.

Como puede observarse en la Fig. 3.19 tiene una barra a la que se le tomará una medida de longitud, teniendo diferentes reglas de medición con sus respectivas graduaciones

y en cada uno de los casos tienen diferentes números significativos, considerando el caso en donde la escala está graduada en centímetros, la longitud del objeto puede informarse como 0.723 m, o sea con tres cifras significativas. El 7 y el 2 pueden leerse directamente con certidumbre, y el 3 es la cifra dudosa o estimada. El número de cifras significativas de un valor informado generalmente se determina como sigue:

- El dígito distinto de cero que se halle más a la izquierda es el más significativo.
- El dígito que se halle más a la derecha es el menos significativo, incluso si es cero.
- Todos los dígitos que se hallen entre los dígitos menos y más significativos son significativos.

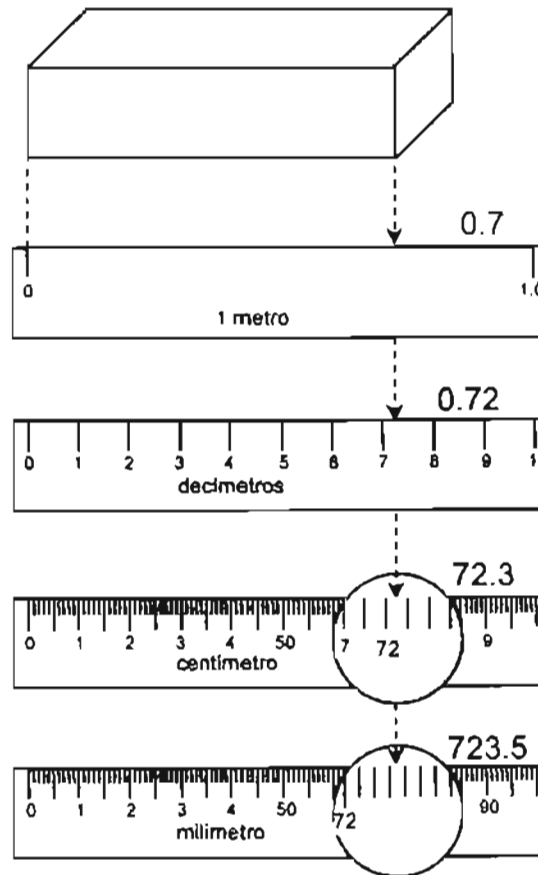


Fig. 3.19 Medición y cifras significativas

### 3.2.3 Método utilizado para determinar la fracción volumétrica del aceite en un punto de la tubería

El espesor de la capa de agua se determinó a partir de la medición del ángulo de contacto de la interfase con la pared interna de la tubería como se muestra en la foto 3.6. y en la fig. 3.20.

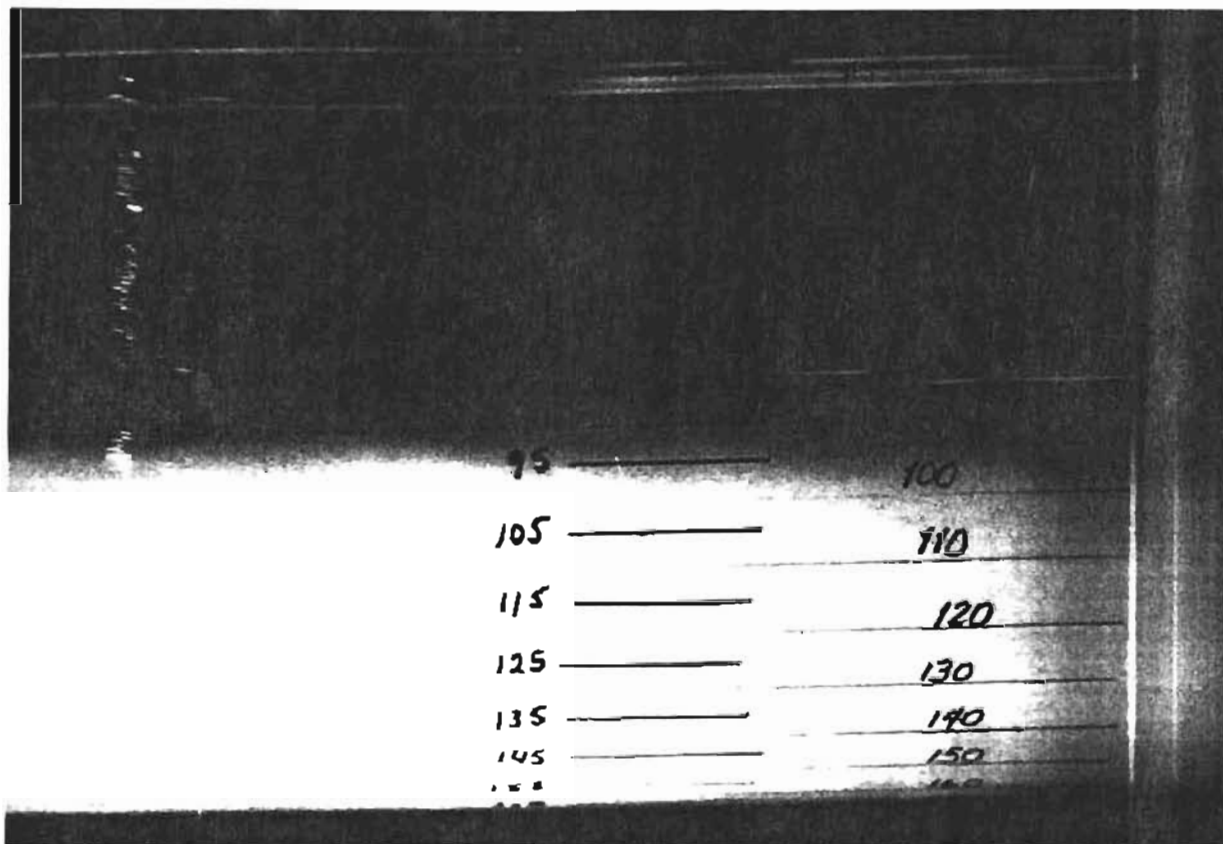


Foto. 3.6 Graduación externa de la sección de pruebas en un punto

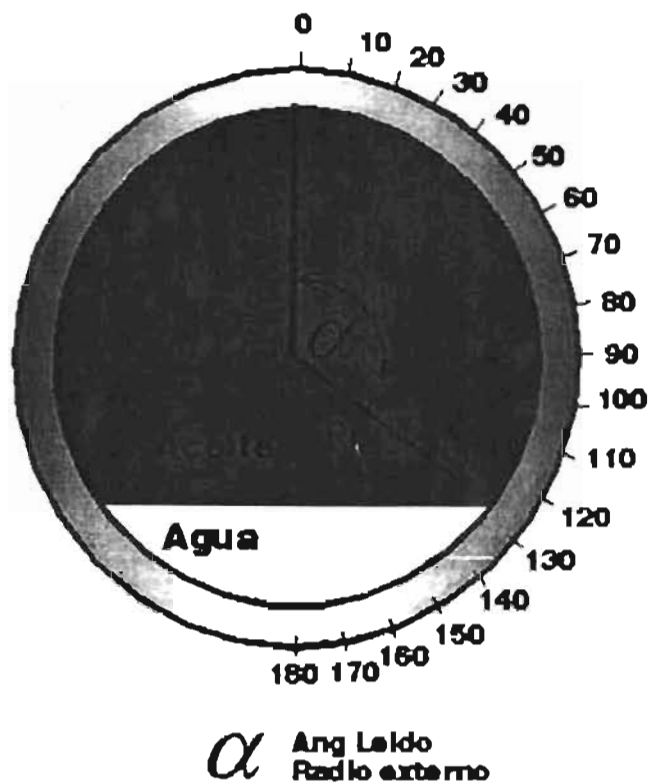


Figura 3.20 Graduación para medir la fracción volumétrica

A partir de la lectura de los grados en la que se encuentra la interfase, se obtiene el área que ocupa el aceite en la sección (Kart Gieck), con lo que podemos determinar la proporción que está ocupando el aceite en esta sección de la tubería (ec.3.2).

$$A = \frac{Ri^2}{2} \left( 2\alpha \frac{\pi}{180} - \text{sen}(2\alpha) \right) \quad (3.2)$$

En la fig. 3.21 se observa que al leer la graduación externa de la tubería (radio externo), donde se encuentra la interfase, no corresponde a la misma lectura de la graduación de la interfase, si la graduación se encuentra en la parte interna del tubo (radio



interno). La diferencia de lecturas se debe a que el tubo de estudio tiene un espesor significativo con respecto a su diámetro. Por lo que hay que realizar una corrección a la lectura que se toma a partir del diámetro externo de la tubería. y así obtener el ángulo correcto que forma la interfase con el eje vertical de la tubería. La corrección del ángulo externo se realiza a partir de la ec. 3.3. y los valores de estas diferencias de ángulos se muestran en la tabla 3.2.

$$\alpha = \arccos\left(\frac{Re \cdot \cos \gamma}{Ri}\right) \quad (3.3)$$

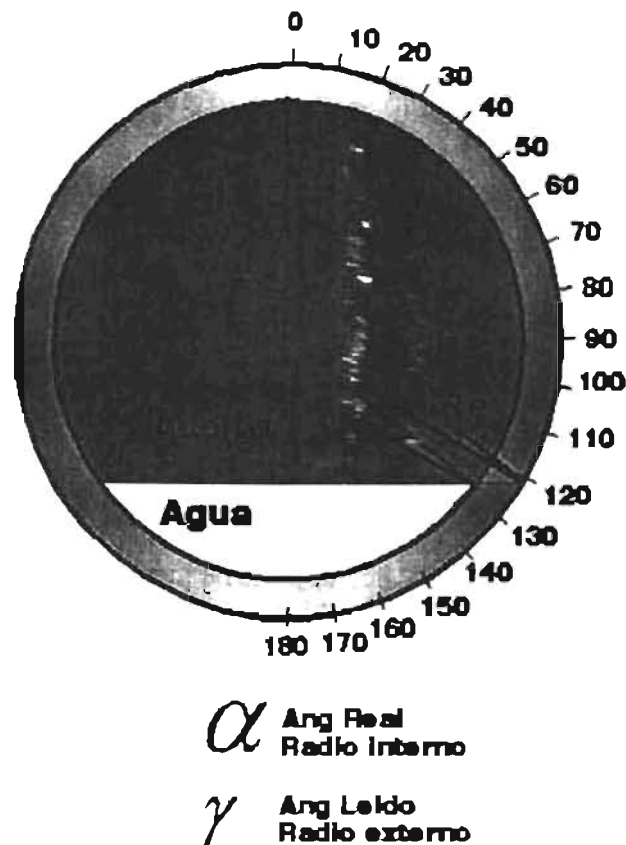


Figura. 3.21 Corrección de la altura de la interfase, medida en grados

Después de realizar la corrección de los grados leídos, a los grados reales, se obtiene el área que corresponde a la fase que se encuentra en la parte superior. Para tener una ecuación con todos los términos involucrados en la corrección de la lectura de los ángulos sustituimos la ec. 3.3 en la ec. 3.2, teniendo a si la ec. 3.4, que determina el área ocupada por aceite.

$$A_o = \frac{Ri}{2} \left[ 2 \arccos \left\{ \frac{Re \cdot \cos \gamma}{Ri} \right\} \frac{\pi}{180} - \operatorname{sen} \left( 2 \arccos \left\{ \frac{Re \cdot \cos \gamma}{Ri} \right\} \right) \right] \quad (3.4)$$

$A_o$  = área ocupada por aceite

$A_u$  = área ocupada por agua

$Ri$  = radio interno de la tubería

$Re$  = radio externo de la tubería

$\gamma$  = ángulo leído en la tubería

$H_w$  = Colgamiento de agua

Para determinar la fracción volumétrica de agua ó colgamiento del agua, se sustituye la ecuación 3.4 y 3.5 en la ecuación 3.6.

$$A_u = \pi R_i^2 - A_o \quad (3.5)$$

$$H_w = \frac{q_w}{q_w + q_o} = \frac{A_u}{A_u + A_o} \quad (3.6)$$

Tabla 3.2. Obtención del colgamiento de agua a partir de la lectura en la tubería con un  $d_i = 77.4$  mm y  $d_e = 90$  mm

grados externos $\gamma$	grados internos $\alpha$	area de aceite	colgamiento $H_o$	colgamiento $H_w$
10	0.00	0.00	0.00	1.00
20	0.00	0.00	0.00	1.00
30	0.00	0.00	0.00	1.00
40	27.03	1.00	0.02	0.98
50	41.83	3.44	0.07	0.93
60	54.45	7.14	0.15	0.85
70	66.57	11.92	0.25	0.75
80	78.35	17.50	0.37	0.63
90	90.00	23.49	0.50	0.50
100	101.65	29.49	0.63	0.37
110	113.43	35.07	0.75	0.25
120	125.55	39.85	0.85	0.15
130	138.37	43.55	0.93	0.07
140	152.97	45.99	0.98	0.02
150	0.00	0.00	1.00	0.00
160	0.00	0.00	1.00	0.00
170	0.00	0.00	1.00	0.00
180	0.00	0.00	1.00	0.00

### 3.2.4 Límite de precisión, límite de desviación e incertidumbre

Cuando se realizan estudios o experimentos, se requiere que los datos obtenidos estén dentro de un rango de confiabilidad de acuerdo al equipo de medición, variables involucradas, condiciones ambientales, etc. Es por esto que es conveniente tener un método que indique en que rango están alejados los datos verdaderos de los medidos. Además de asegurar la uniformidad de la presentación de los datos experimentales y aumentar la conciencia del autor, estimando la importancia de dar una afirmación más correcta acerca de la medida de la incertidumbre. De acuerdo al artículo "Policy on Reporting Uncertainties in Experimental Measurements and Results"<sup>16</sup> para cada resultado mostrado, la presentación de los datos experimentales deberá incluir la siguiente información:

1. El límite de precisión,  $P$ . El intervalo  $\pm P$  cercano a un resultado nominal (simple o promediado) es del 95 por ciento de confianza, estimado del rango dentro del cual el representativo de muchos de estos resultados caerá, si los experimentos fueron repetidos cuantas veces bajo las mismas condiciones usando el mismo equipo. Así, el límite de precisión es un estimado de la falta de repetición causada por errores de redondeo e inestabilidad.
2. El límite de desviación,  $D$ . El límite de desviación es un estimado de la magnitud del error fijo o error constante. Esto es asignado con el entendimiento de que el experimento es 95 % confiable del valor verdadero, si el error de desviación es conocido, deberá ser menor del valor  $|D|$ .
3. La incertidumbre,  $U$ . El intervalo  $\pm U$  cercano al resultado nominal es la banda dentro de la cual el experimento es 95 % confiable al valor real del resultado falso. El 95 % de confianza de incertidumbre es calculado como:

$$U = [D^2 + P^2]^{1/2}, \quad (3.7)$$

4. Una descripción breve de los métodos usados para en el análisis de incertidumbre.

Lo estimado de los límites de precisión y de los límites de desviación será hecho sobre un intervalo de tiempo representativo para el experimento. La siguiente información adicional deberá ser presentada preferentemente en forma tabular.

- a) Los límites de precisión y desviación para cada variable y parámetro usado.
- b) La ecuación por la cual cada resultado fue calculado.
- c) Una afirmación comparando la dispersión observada en resultados sobre experimentos repetidos (si es realizado) con la dispersión esperada ( $\pm P$ ) basado en el análisis de incertidumbre.

Considerando en el experimento gastos fijos de líquido en la entrada de la tubería de prueba, teniendo bien definidos el diámetro exterior ( $d_e$ ) e interior ( $d_i$ ), lo que se pretende es determinar el colgamiento de agua ( $H_w$ ), con la medida del ángulo exterior de la interfase. El cual es función del  $d_i$ ,  $d_e$  y ángulo externo de la tubería ( $\gamma$ ).

$$H_w = f(\gamma, d_i, d_e), \quad (3.8)$$

sustituyendo los valores de  $A_w$  y  $A_o$  en la ec. 3.6, y reduciendo términos queda:

$$H_w = 1 - \left[ \frac{\frac{\pi}{180} * 2\gamma - \text{sen}(2\gamma)}{2\pi} \right], \quad (3.9)$$

#### *Límite de precisión*

El límite de precisión (LP) para el experimento fue considerado 0, debido a que son pocas las mediciones realizadas.

#### *Límite de desviación*

El límite de desviación (LD) es  $B = \pm 0.5 I$  donde  $I$  es la graduación menor del equipo de medición, por lo que los límites de desviación de las variables involucradas  $d_i$ ,  $d_e$  y  $\gamma$  son;

$$D_{d_i} = \pm 0.5 I_{d_i}, \quad (3.10)$$

$$D_{d_e} = \pm 0.5 I_{d_e}, \quad (3.11)$$

$$D_{\gamma} = \pm 0.5 I_{\gamma}, \quad (3.12)$$

respectivamente.

El 95 % de confianza de la incertidumbre.  $U_{H_w}$  en el resultado experimental  $H_w$ , esta dado por la combinación de la contribución referente a la desviación y precisión ( $D_{H_w}$  y  $P_{H_w}$ ) como:

$$U_{H_w} = \sqrt{D_{H_w}^2 + P_{H_w}^2}, \quad (3.13)$$

Estas dos contribuciones pueden ser evaluadas por separado en términos de los coeficientes de sensibilidad de los resultados,  $H_w$ , para las cantidades medidas  $\left(\frac{\partial H_w}{\partial d_i}\right)$  siguiendo la propagación de la ecuación de Kline and McClintock (1955).

$$P_{H_w}^2 = \left(\frac{\partial H_w}{\partial d_i}\right)^2 (Pd_i)^2 + \left(\frac{\partial H_w}{\partial d_e}\right)^2 (Pd_e)^2 + \left(\frac{\partial H_w}{\partial \gamma}\right)^2 (P\gamma)^2, \quad (3.14)$$

y

$$D_{H_w}^2 = \left(\frac{\partial H_w}{\partial d_i}\right)^2 (Dd_i)^2 + \left(\frac{\partial H_w}{\partial d_e}\right)^2 (Dd_e)^2 + \left(\frac{\partial H_w}{\partial \gamma}\right)^2 (D\gamma)^2, \quad (3.15)$$

Como  $P=0$  la ecuación 3.13 queda:

$$U_{H_w} = \sqrt{D_{H_w}^2}, \quad (3.16)$$

sustituyendo 3.15 en 3.16 tenemos:

$$U_{H_w} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_w}{\partial d_i}\right)^2 (Dd_i)^2 + \left(\frac{\partial H_w}{\partial d_e}\right)^2 (Dd_e)^2 + \left(\frac{\partial H_w}{\partial \gamma}\right)^2 (D\gamma)^2}, \quad (3.17)$$

que es la ecuación necesaria para el cálculo de la incertidumbre dentro del experimento, pero como la ecuación 3.9 solo es función de  $\gamma$ , ésta se reduce a;

$$U_{H_w} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_w}{\partial \gamma}\right)^2 (D\gamma)^2}, \quad (3.18)$$

La derivada de  $\frac{\partial H_w}{\partial \gamma}$  es;

$$\frac{\partial H_w}{\partial \gamma} = \left( \frac{\cos(2\gamma) - \frac{\pi}{180}(2\gamma)}{2\pi} \right), \quad (3.19)$$

sustituyendo la ecuación 3.19 y el valor de  $D\gamma$  en 3.18

$$U_{H_w} = \sqrt{\left( \frac{\cos(2\gamma) - \frac{\pi}{180}(2\gamma)}{2\pi} \right)^2 \pm (0.5I_\gamma)^2}, \quad (3.20)$$

Ejemplo:

La graduación mínima es de 5 grados ( $I_\gamma = 0.5$ ); por otra parte si consideramos realizar el estudio para el valor mínimo de la tabla 3.1 que corresponde al valor de 65 grados.

Con la ecuación 3.20 obtenemos el valor de 1.4% de incertidumbre en la medición. Por lo que podemos considerar el experimento aceptable en su medición.



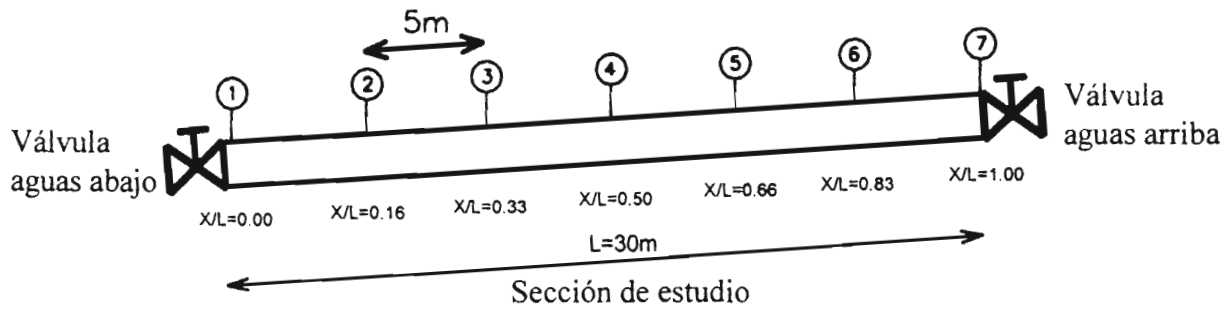
## **CAPÍTULO 4**

# **RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL**

### **4.1 Descripción del experimento**

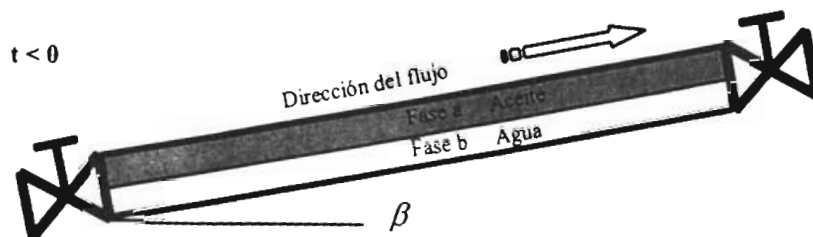
El estudio consiste en determinar la variación del colgamiento del agua (fracción volumétrica de las fases) en varios puntos de la tubería con respecto al tiempo. Durante el fenómeno transitorio de flujo contracorriente de dos fluidos inmiscibles (agua-aceite) en una tubería experimental ligeramente inclinada ( $\beta = 0.35^\circ$ ).

Para obtener los datos experimentales, se midieron los colgamientos de agua en siete puntos de la tubería como se muestra en la figura 4.1 durante 720 segundos.



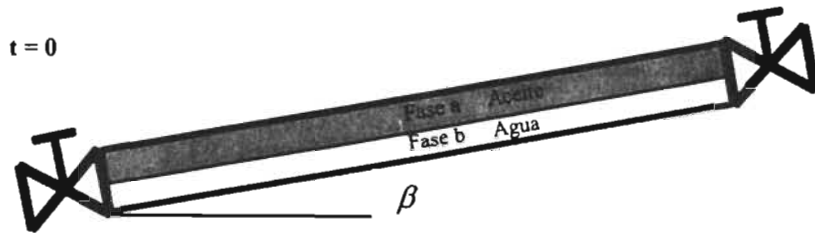
**Figura.4.1** Puntos de medición del colgamiento de agua en la tubería.

El experimento se realizó en una tubería ligeramente inclinada, donde las válvulas que están en los extremos de la tubería de estudio están abiertas antes de iniciar el experimento ( $t < 0$ ) y se establece un flujo ascendente con gastos de agua y aceite constantes, obteniendo así un flujo estratificado



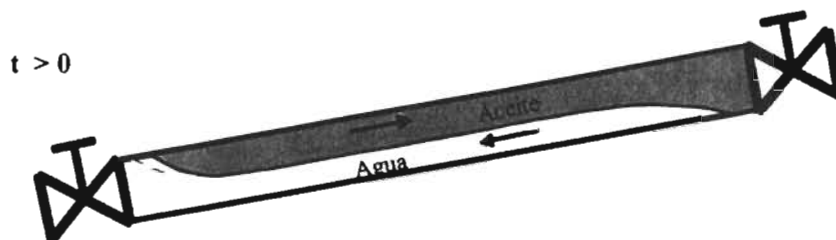
**Figura 4.2** Distribución inicial de fases en la sección de prueba.

Para  $t = 0$ , las válvulas que se encuentran en los extremos de la tubería se cierran simultáneamente, lo que produce un flujo neto cero dentro de la tubería.



**Figura 4.3** Para  $t=0$  se realiza el cierre de las válvulas.

Para  $t > 0$  inicia el flujo contracorriente de dos fluidos inmiscibles (redistribución de las fases) dentro de la tubería. La toma de lecturas del ángulo de contacto de la interfase con la pared se realiza durante 720s.



**Figura 4.4** Inicia el flujo contracorriente transitorio de dos líquidos inmiscibles.

Para un tiempo muy largo, el flujo contracorriente (el reacomodo de las fases) se ha completado y los líquidos se encuentran en reposo.



**Figura 4.5** Distribución final de las fases en la tubería.

A continuación se muestran los datos de laboratorio obtenidos de forma experimental.

## 4.2 Resultados del experimento

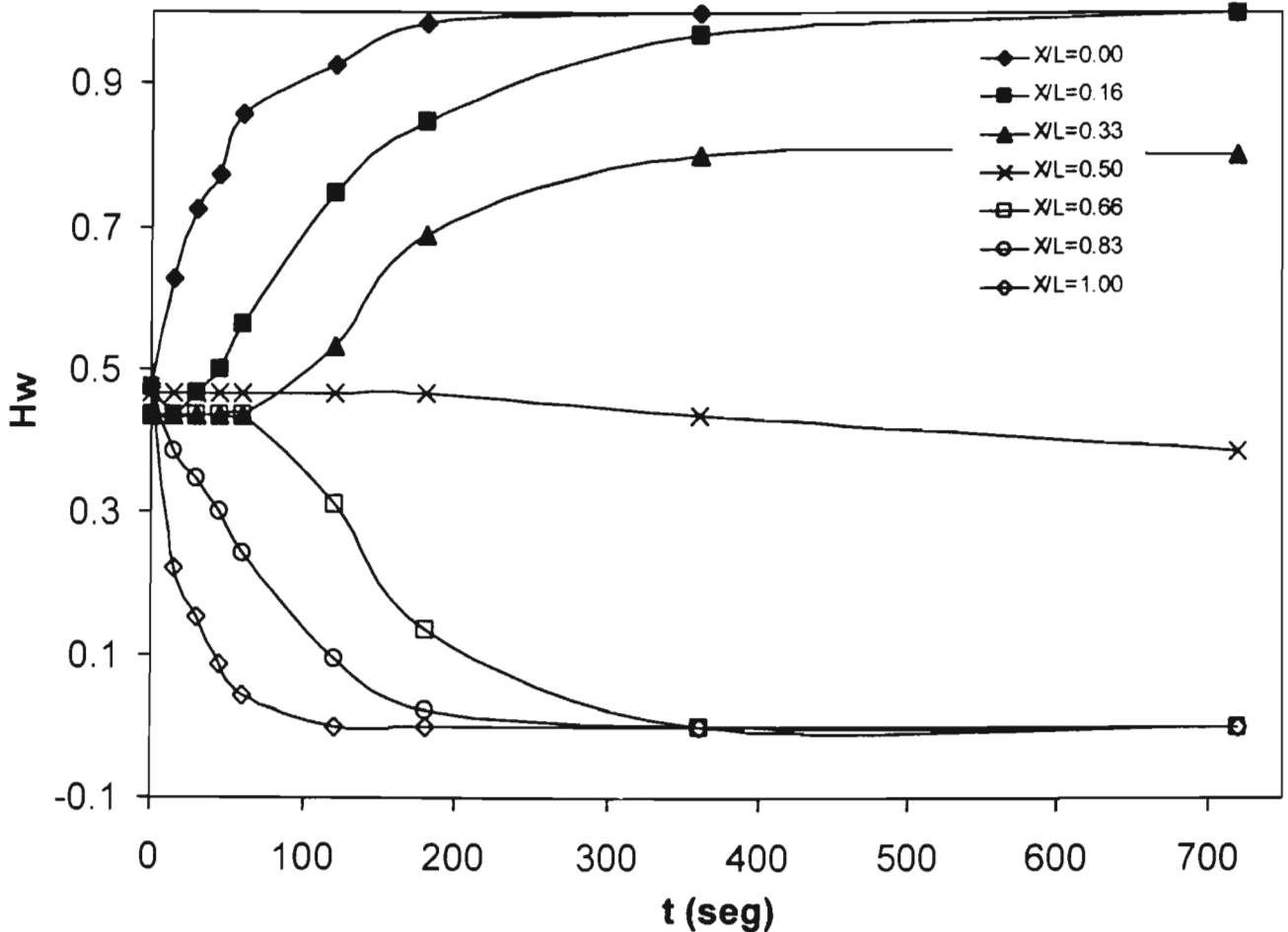
Dos pruebas se realizaron en el circuito experimental, donde los gastos agua-aceite de la primera prueba son diferente a los gastos de la segunda prueba. En la tabla 4.1 se muestran las características de los líquidos utilizados.

**Tabla 4.1** Propiedades de los líquidos utilizados

Parámetro	Valor
Viscosidad del agua	1.002 cp a 25°C
Viscosidad de aceite	5.000 cp a 25°C
Densidad del agua	1.03 gr/m <sup>3</sup>
Densidad del aceite	0.84 gr/cm <sup>3</sup>

### 4.2.1 Primera prueba experimental

En la primera prueba, se establece un gasto total aproximado de 1 (l/s). Los gastos de las fases se varían para alcanzar un colgamiento de agua inicial de 50%. La temperatura de los fluidos es de 20°C. En la figura 4.6 se observa la variación del colgamiento del agua en siete puntos de la tubería. En el punto  $x/L = 0$  se observa el rápido incremento del colgamiento del agua durante los primeros 50 s, después el incremento del colgamiento disminuye, y este punto de la tubería se llena de agua a  $t = 200$  s. En el punto  $x/L = 0.16$  se observa que el colgamiento del agua se mantiene en 0.48 durante los primeros 50 s, y posteriormente se incrementa el colgamiento hasta que se llena este punto de la tubería con agua a  $t = 700$  s. El colgamiento del agua permanece constante en 0.48 en el punto  $x/L = 0.33$  durante los primeros 70 s, y posteriormente se incrementa hasta 0.80 en donde nuevamente se mantiene lineal desde los 400 s hasta los 700 s. El colgamiento que se observa para el punto  $x/L = 0.50$  muestra una disminución con el tiempo, al iniciar con un colgamiento de 0.48, hasta llegar a 0.40 a  $t = 700$  s. Los puntos restantes muestran un perfil similar a los puntos descritos, con la diferencia que el colgamiento disminuye y la tubería se llena de aceite. Los puntos de los perfiles que muestran una línea horizontal, indican que el flujo contracorriente ha finalizado en esos puntos, como se observa en los perfiles  $x/L=0$ ,  $x/L=0.66$ ,  $x/L=0.83$  y  $x/L=1.00$ . En este experimento se observa cambios pequeños del colgamiento después de  $t = 350$  s, debido a que el flujo contracorriente casi ha terminado.



**Figura 4.6** Variación del colgamiento de agua

En la figura 4.7 se observan las diferentes formas de los perfiles del colgamiento al incrementarse el tiempo. El perfil para  $t = 0$  s es una línea horizontal a lo largo de toda la tubería, debido a que aún no inicia el flujo contracorriente. Desde el perfil 15s hasta el perfil 180 s se observa el incremento de la variación del colgamiento de agua desde los extremos hacia el centro de la tubería. En el centro de la tubería ( $x/L = 0.50$ ) no se observa variación del colgamiento del agua durante todo el proceso de flujo contracorriente, debido a que los gastos iniciales de agua y aceites son iguales. La existencia de dos o más perfiles

de colgamiento iguales, indican que el flujo contracorriente transitorio ha finalizado como se puede ver para los perfiles para  $t = 360$  s y  $t = 720$  s. En los extremos de estos perfiles se observan unas líneas horizontales, que indican que estos puntos de la tubería se encuentran completamente llenos por un solo líquido.

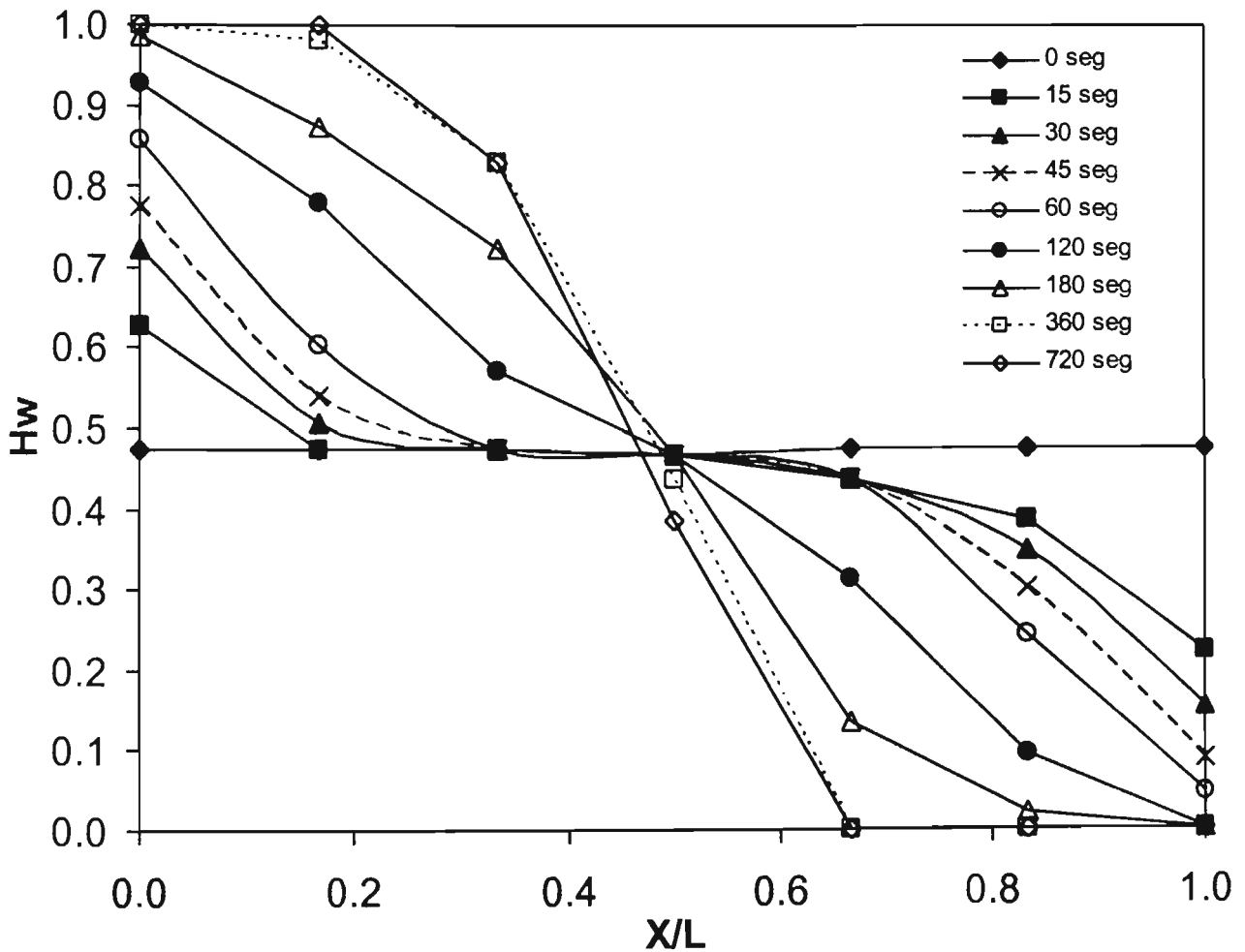
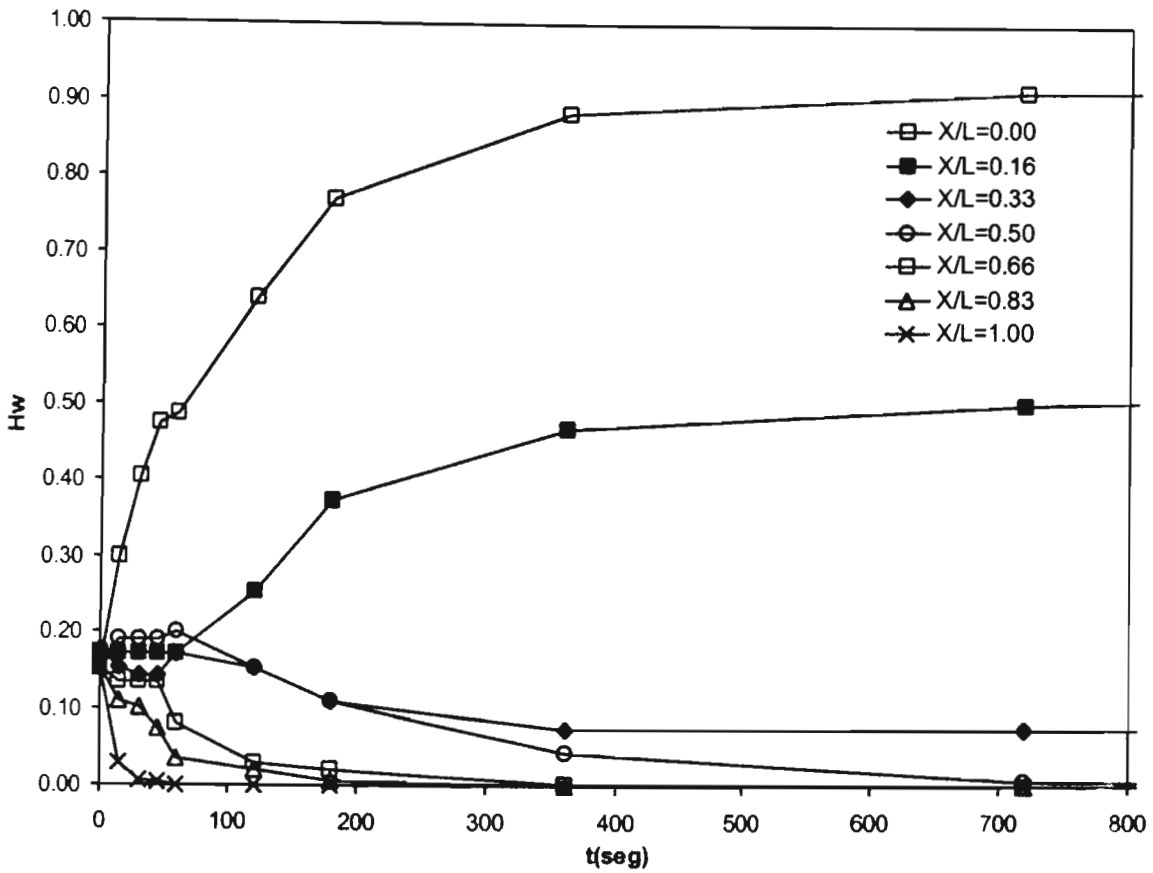


Figura 4.7 Perfiles transitorios de colgamiento de agua en la tubería

### 4.2.2 Segunda prueba experimental

En la segunda prueba, se establece un gasto total aproximado de 1 (l/s). Los gastos de las fases se varían para alcanzar un colgamiento de agua inicial de 15%. Los líquidos están a una temperatura de 20°C. En la figura 4.8 se observa la variación del colgamiento del agua en siete puntos de la tubería. En el punto  $x/L = 0$  se observa un rápido incremento del colgamiento del agua en los primeros 180 s, llegando a 0.77, después se aprecia un ligero incremento hasta llegar a 0.90 a  $t = 720$  s. En el punto  $x/L = 0.16$  se ve que el colgamiento de 0.15 se mantiene constante durante los primeros 60 s, y posteriormente se incrementa hasta que llega a su nivel final de 0.50 a  $t = 720$  s. El perfil  $x/L = 0.33$  permanece constante con un colgamiento de 0.15 durante los primeros 60 s, e inicia el descenso de su colgamiento hasta llegar a 0.10 a  $t = 360$  s, con este valor el perfil se mantiene constante hasta el final de la prueba. Los perfiles de  $x/L = 0.83$  y  $x/L = 1.00$  muestran un rápido descenso del colgamiento de agua desde el inicio de la prueba, por lo que estos puntos de la tubería se llenan de aceite desde los 360 s. En los perfiles  $x/L = 0.66$ ,  $x/L = 0.83$  y  $x/L = 1.00$  se pueden observar líneas horizontales que indican que ha finalizado el flujo contracorriente transitorio.

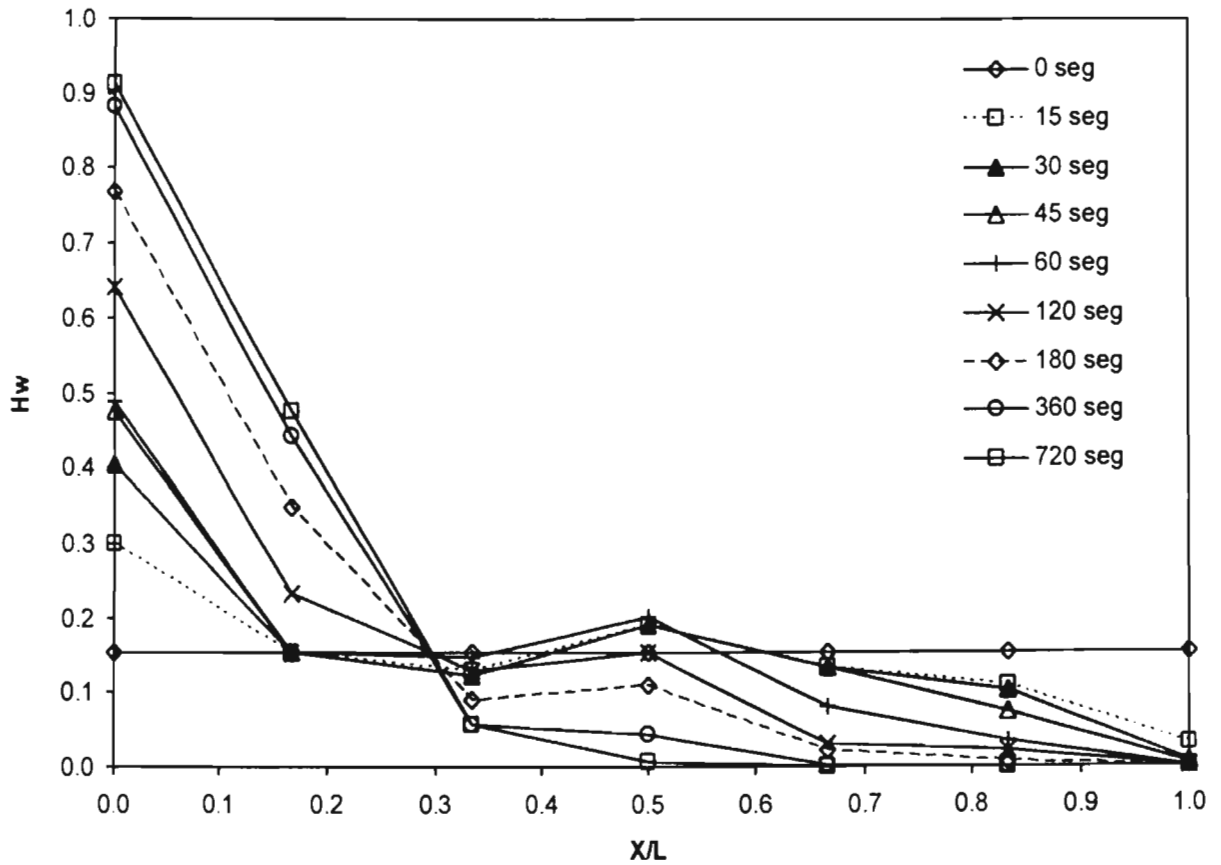




**Figura 4.8** Variación del colgamiento de agua

En la figura 4.9 se muestran las diferentes formas de los perfiles de colgamiento al incrementarse el tiempo. El perfil para 0 s es una línea horizontal a lo largo de toda la tubería, debido a que aún no inicia el flujo contracorriente. Desde el perfil 15 s hasta el perfil 180 s se observa el incremento de la variación del colgamiento de agua desde los extremos hacia el punto  $X/L = 0.3$ . El punto donde se interceptan todos los perfiles ( $X/L = 0.30$ ) se encuentra desplazado del centro debido a que el colgamiento inicial del agua es de 15%. La existencia de dos ó mas perfiles de colgamiento iguales, indican que el flujo

contracorriente transitorio ha finalizado, como se puede ver para los perfiles 360 s y 720 s. Estos perfiles, en el extremo derecho, tienen unas líneas horizontales, que indican que estos puntos de la tubería se encuentran completamente llenos de aceite.



**Figura 4.9** Perfiles transitorios de colgamiento de agua en la tubería

## CAPÍTULO 5

### MODELO MATEMÁTICO

#### 5.1 Descripción del modelo

Este capítulo consiste en predecir el colgamiento de agua a partir del modelo desarrollado por Fairuzov (2003) en varios puntos de la tubería de estudio con respecto al tiempo, durante el fenómeno transitorio de flujo contracorriente de dos fluidos inmiscibles (agua-aceite), en una tubería ligeramente fuera de la horizontal ( $\beta = 0.35^\circ$ ) con gasto total nulo.

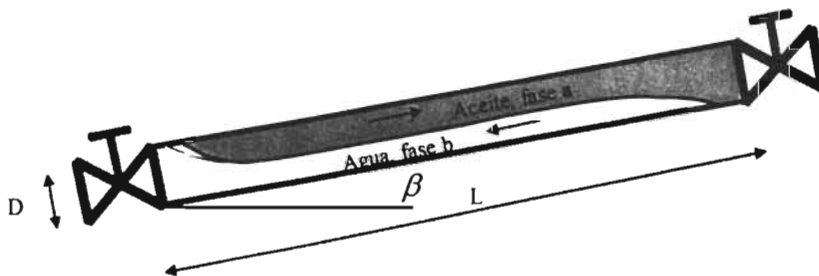


Figura 5.1 Flujo contracorriente de dos líquidos inmiscibles en una tubería inclinada

El problema de estudio se muestra esquemáticamente en la figura 5.1, en la cual se observa una tubería ligeramente inclinada de longitud  $L$  y diámetro  $D$ , por la que fluyen dos líquidos inmiscibles. Inicialmente, las fases están uniformemente distribuidas a lo largo de la tubería. El flujo contracorriente de dos líquidos inmiscibles inicia al detener el flujo de los líquidos por la tubería, al cerrar las válvulas que están en los extremos de la tubería de estudio.

## 5.2 Ecuaciones básicas

Para un flujo estratificado, incompresible e isotérmico de dos líquidos inmiscibles, las ecuaciones promedio básicas del modelo de dos fluidos pueden ser escritas de la siguiente forma:

Ecuación de conservación de masa para la fase b.

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_b + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_b U_b) = 0 . \quad (5.1)$$

donde  $U_b$  es la velocidad de la fase b.

La ecuación de la conservación de la masa para la mezcla en forma integral.

$$U_a \alpha_a + U_b \alpha_b = U_m . \quad (5.2)$$

donde:

$$\alpha_a + \alpha_b = 1 , \quad (5.3)$$

así,  $U_a$  y  $\alpha_a$  son la velocidad y la fracción de volumétrica de la fase a, respectivamente,  $U_m$  es la velocidad de la mezcla. Después del paro en la línea todo el flujo es igual a cero, así la Eq.(2) se reduce a

$$U_a \alpha_a + U_b \alpha_b = 0 . \quad (5.4)$$

Combinando la ecuación de momentum (Brauner y Maron<sup>13</sup>, 1992)

$$\rho_b \frac{\partial U_b}{\partial t} - \rho_a \frac{\partial U_a}{\partial t} + \rho_b U_b \frac{\partial U_b}{\partial x} - \rho_a U_a \frac{\partial U_a}{\partial x} + (\rho_b - \rho_a)g \cos \beta \frac{\partial h_b}{\partial x} + \frac{\partial (P_{ib} - P_{ia})}{\partial x} = F, \quad (5.5)$$

donde

$$F = -\tau_b \frac{S_b}{\alpha_b A} + \tau_i S_i \left( \frac{1}{\alpha_a A} + \frac{1}{\alpha_b A} \right) + \tau_a \frac{S_a}{\alpha_a A} + (\rho_b - \rho_a)g \operatorname{seno} \beta. \quad (5.6)$$

donde  $\rho_a$  y  $\rho_b$  son las densidades de las fases a y b, respectivamente; x es la coordenada axial;  $h_b$  es la altura de las interfases;  $\tau_a$  y  $\tau_b$  son los esfuerzos cortantes en la pared para las fases a y b respectivamente;  $\tau_i$  es el esfuerzo interfacial;  $S_a$  y  $S_b$  son los perímetros mojados para las fases a y b respectivamente;  $S_i$  es el perímetro de la interfase; g es la aceleración de la gravedad;  $P_{ia}$  y  $P_{ib}$  son las presiones de las interfases para las fases a y b respectivamente; y A es el área transversal de la tubería.

La redistribución de las fases en tuberías largas ( $L \gg D$ ) es un proceso transitorio lento. En procesos transitorios lentos, las fuerzas de fricción y gravedad son dominantes, y por lo que las fuerzas de inercia pueden ser despreciadas (Taitel y Barnea<sup>14</sup>, 1997). Una estimación posterior de los términos en la eq. 5 puede ser también realizada mostrando que esta consideración esta justificada en este caso de estudio. Así, la ecuación de momento combinada. eq. 5, puede ser escrita de la siguiente manera:

$$-\tau_b \frac{S_b}{\alpha_b} + \tau_i S_i \left( \frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\alpha_b} \right) + \tau_a \frac{S_a}{\alpha_a} + (\rho_b - \rho_a)Ag \left( \operatorname{sen} \beta - \cos \frac{\partial h_b}{\partial x} \right) = 0. \quad (5.7)$$

El análisis de la Eq. 7 revela que la redistribución de la fase puede ser causada también por la inclinación de la tubería ( $\beta \neq 0$ ) o por la distribución no uniforme del colgamiento a lo largo de la longitud de la tubería ( $\frac{\partial h_b}{\partial x} = 0$ ). La dirección de movimiento de la fase esta determinada en cada caso por la suma de los dos efectos.

Es de interés observar que cuando el sistema esta en reposo ( $\tau_a, \tau_b, \tau_i \rightarrow 0$ ) la ecuación de momento adquiere la siguiente forma:

$$\sin \rho - \cos \beta \frac{\partial h_b}{\partial x} = 0, \quad (5.8)$$

ó

$$\frac{\partial h_b}{\partial x} = \tan \beta. \quad (5.9)$$

Conforme a la eq. 9 la interfase esta siempre paralela a la superficie de la tierra cuando ambos líquidos están en reposo. Esta es una condición obvia para el equilibrio mecánico (estático) dentro del sistema.

### 5.3 Relaciones constitutivas

En este trabajo se investiga el flujo de dos fases liquido-liquido transitorio lento estratificado, por consiguiente para evaluar los términos del esfuerzo cortante en la ecuación de momento, las relaciones cuasi-estables de cierre propuestas por Brauner y Maron (1992) son utilizadas.

$$\tau_k = f_k \frac{\rho_k U_k |U_k|}{2}, \quad k=a,b. \quad (5.10)$$

donde  $f_k$  es el factor de fricción por fase  $k$ .

El factor de fricción  $f_a$  y  $f_b$  en la Eq. (10) son evaluados utilizando las definiciones ajustables de diámetros hidráulicos equivalentes (Brauner y Maron 1992). El esfuerzo interfacial es pronosticado usando la correlación de Brauner-Marón para la fricción interfacial.

$$\tau_i = f_i \frac{\rho(U_a - U_b)|U_a - U_b|}{2}, \quad (5.11)$$

donde

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_a \text{ y } f_i = Bf_a \text{ para } |U_a| \geq |U_b|, \\ \rho &= \rho_a \text{ y } f_i = Bf_b \text{ para } |U_a| < |U_b|, \end{aligned} \quad (5.12)$$

En la Eq.(12) vemos el factor  $B$ , llamado “factor de ondulación” (Brauner y Maron<sup>13</sup>, 1992) y  $f_i$  es el factor de fricción interfacial. El calculo de  $B$  para las ondulaciones interfaciales sobre el esfuerzo cortante interfacial. Para un flujo quieto estatificado  $B \approx 1$ , mientras que para un flujo ondulado estratificado o con un patrón estratificado con mezcla en la interfase del de flujo  $B > 1$ .

#### 5.4 Condiciones iniciales y de frontera

En el primer problema, la distribución inicial de la fracción de volumen de la fase b es uniforme en cada sección de la línea, Fig. 1:

$$\begin{aligned} \text{En } t=0, \text{ para } 0 < x < L/2, \\ \alpha_b(x) = \alpha_{b1} \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} \text{y en } t=0, \text{ para } L/2 < x < L, \\ \alpha_b(x) = \alpha_{b2}. \end{aligned} \quad (5.14)$$

En el segundo problema, Fig. 2:

$$\text{En } t=0, \text{ para } 0 < x < L, \quad (5.15)$$

$$\alpha_h(x) = \alpha_{bo}$$

Ambos extremos de la tubería son cerrados durante los transitorios simulados. De esta manera las condiciones límites para ambos casos son:

$$\begin{aligned} \text{En } x = 0 \text{ y } x = L, \text{ para } t > 0, \\ U_b = 0. \end{aligned} \tag{5.16}$$

Una detallada descripción del método numérico utilizado para resolver las ecuaciones gobernantes, Eq. (1), (2) y (7) pueden ser encontradas en el artículo (Fairuzov, 2000). La malla consiste en 100 celdas que fueron usadas en la ejecución de la simulación numérica.

## 5.5 Resultados de las simulaciones.

En las siguientes figuras se muestran los resultados de las predicciones del flujo contracorriente de dos líquidos inmiscibles, obtenidas del modelo matemático realizado por Fairuzov (2003). Estas predicciones se realizaron con los valores de las variables del fenómeno de flujo contracorriente utilizados al realizar las pruebas experimentales de laboratorio.



### 5.5.1 Predicción de la primera prueba

La predicción de la primera prueba se realiza con un colgamiento de 50% de agua .

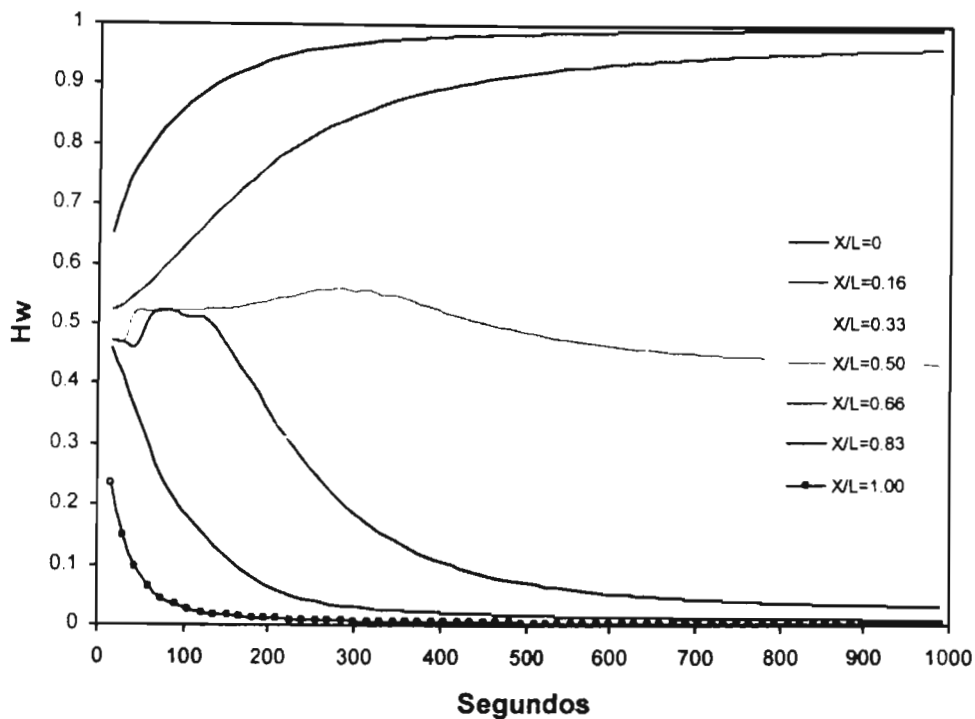
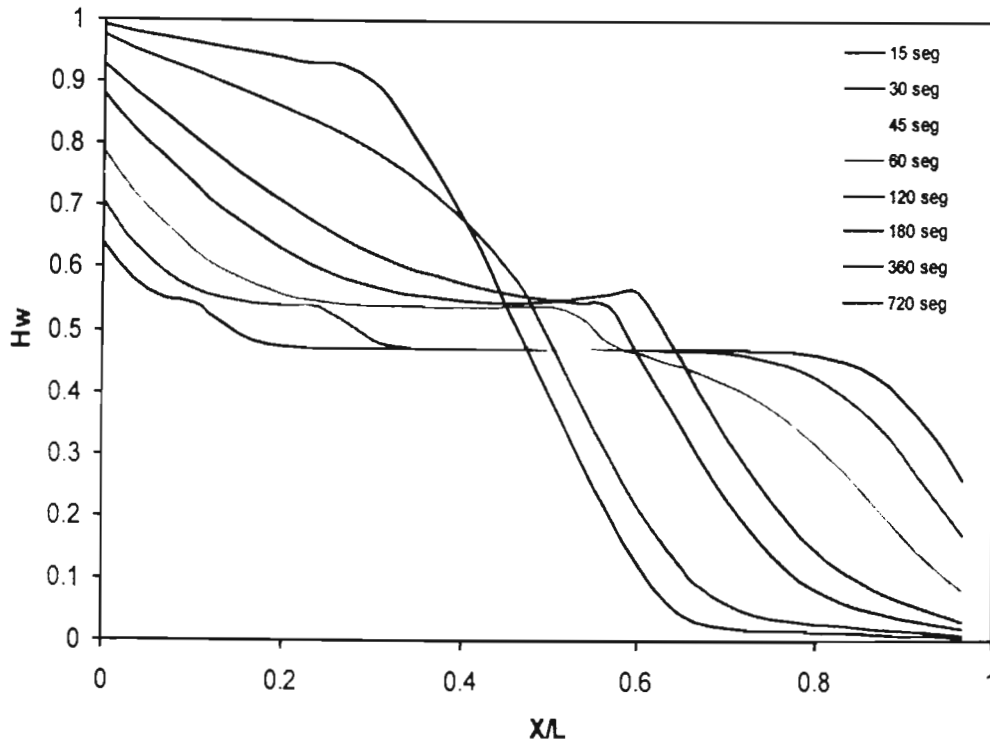


Figura 5.2 Variación del colgamiento del agua

La figura 5.2 muestra la variación del colgamiento calculado del agua, al incrementarse el tiempo para cada uno de los siete puntos de estudio en la tubería. Los perfiles de los puntos  $x/L=0$ ,  $x/L=0.16$  y  $x/L=0.33$  muestran una simetría del colgamiento del agua con los perfiles de los puntos  $x/L=0.66$ ,  $x/L=0.83$  y  $x/L=1.00$ , debido a que las proporciones de los líquidos son iguales. El perfil  $x/L=0.50$  permanece cercano al 50% del colgamiento de agua tal y como se esperaba a partir de las pruebas experimentales.

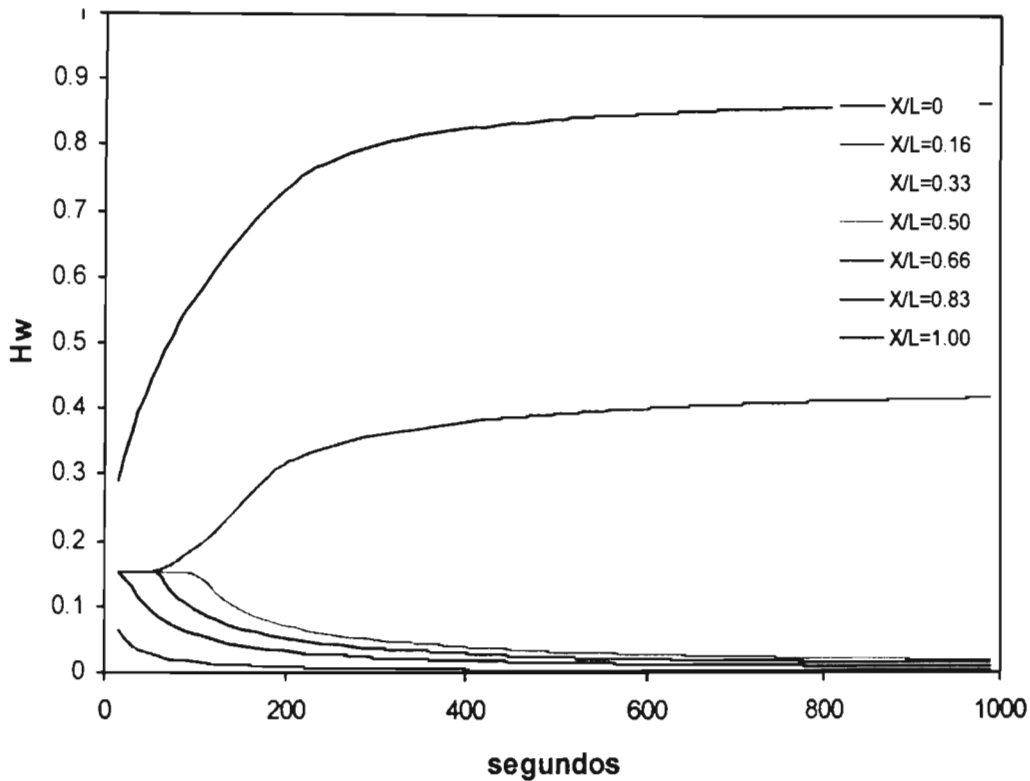


**Figura 5.3** Perfiles transitorios de colgamiento de agua en la tubería

La figura 5.3 muestra las distintas formas de los perfiles calculados del colgamiento del agua a lo largo de toda la tubería al incrementarse el tiempo. Se observa que la intersección de todas los perfiles ocurre desde  $x/L=0.45$  hasta  $x/L=0.65$ . El perfil para 15 s muestra en la parte central una recta que indica la proporción agua-aceite al iniciar el experimento. En los extremos de este perfil se observa el inicio del flujo transitorio contracorriente. El perfil para 720 segundos tienen una forma de “Z” y están compuestos por tres secciones, las cuales son: sección extrema izquierda, central y extrema derecha. La sección extrema izquierda indica que el tubo está lleno de agua y la sección extrema derecha indica que la tubería está llena de aceite. La parte central indica que en esa sección de la tubería hay una interfase agua-aceite de proporciones mesurables.

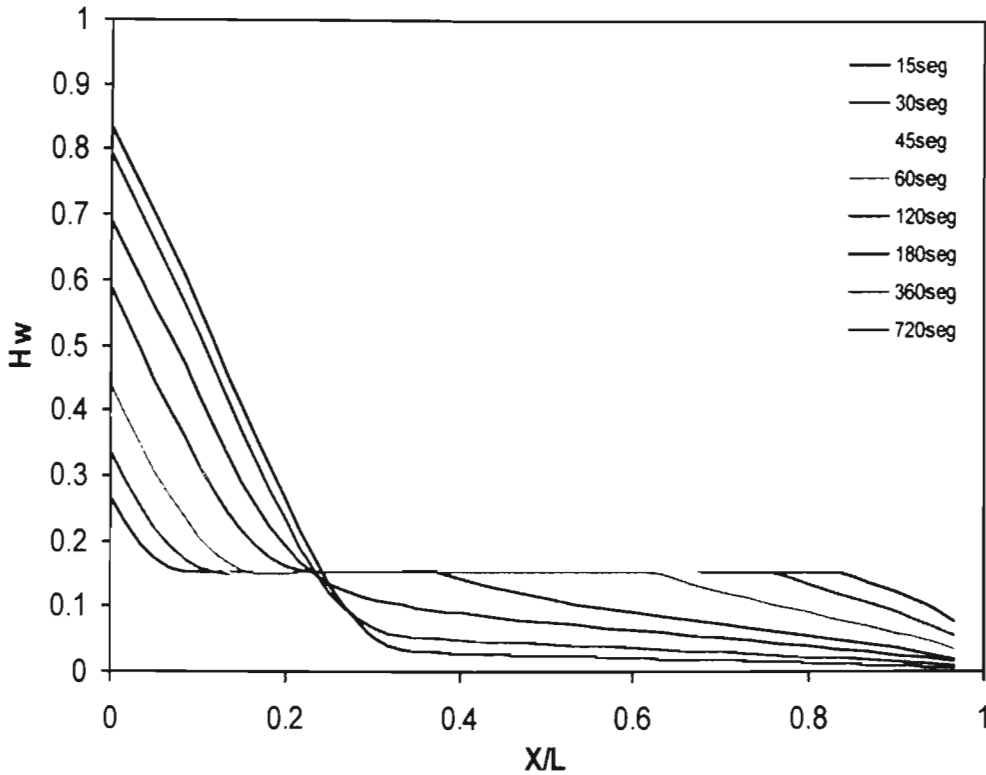
### 5.5.2 Predicción de la segunda prueba

La segunda predicción se realiza con un gasto de 15% de agua y 85% de aceite.



**Figura 5.4** Variación del colgamiento de agua.

La figura 5.4 muestra la variación del colgamiento calculado del agua, al incrementarse el tiempo para cada uno de los siete puntos de estudio en la tubería. En esta predicción no hay simetría de ningún punto, debido a que las proporciones de los líquidos no son iguales. Todos los puntos inician con un colgamiento de agua de 15%, el cual es la condición inicial para la predicción con el modelo. La predicción de la forma de los perfiles de flujo contracorriente son similares a los perfiles obtenidos experimentalmente en el laboratorio.



**Figura 5.5** Perfiles transitorios de colgamiento de agua en la tubería

La figura 5.5 muestra las distintas formas de los perfiles calculados del colgamiento del agua a lo largo de toda la tubería al incrementarse el tiempo. El perfil para 15s muestra en la parte central una recta que indica el colgamiento al iniciar el experimento, en los extremos de este perfil se observa el inicio del flujo transitorio contracorriente. El perfil para 720s. muestra tiene forman una “L”, formada por dos rectas inclinadas, a la izquierda del punto donde se interceptan todas los perfiles se observa una línea inclinada que representa la interfase agua-aceite de proporciones mesurables, a la derecha se observa una línea ligeramente fuera de la horizontal, que indica que la tubería se encuentra llena de aceite.

## CAPÍTULO 6

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se comparan los perfiles transitorios de flujo contracorriente obtenidos experimentalmente, contra los perfiles transitorios calculados por el modelo descrito en el capítulo 5.

#### **6.1 Comparación de los perfiles transitorios del colgamiento de agua de la primera prueba**

Como se describió en los capítulos cuatro y cinco, la primera prueba se realizó en una tubería ligeramente inclinada ( $\beta = 0.35^\circ$ ) con un colgamiento inicial de agua de 47%.

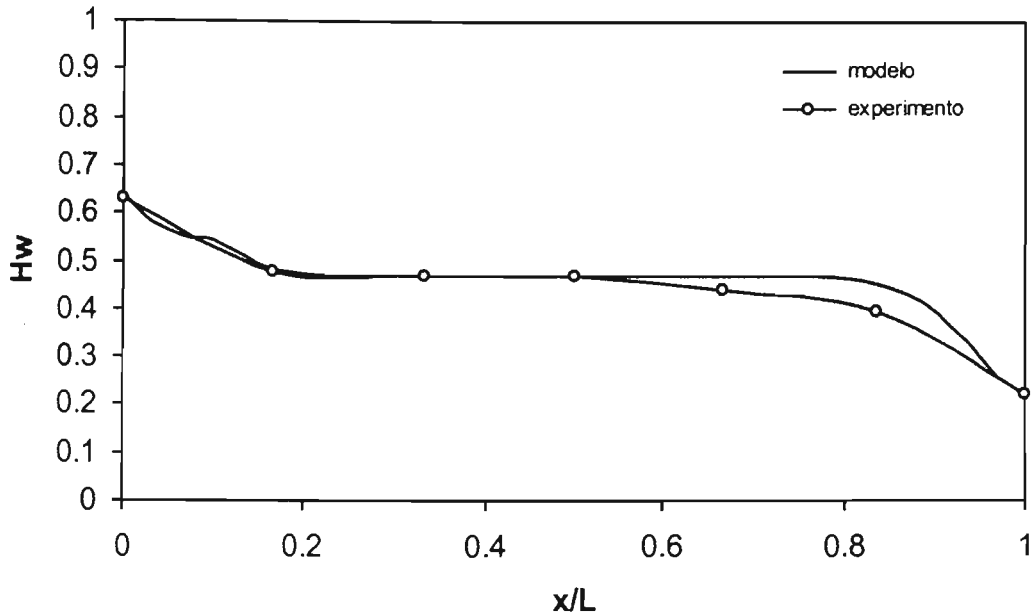


Figura 6.1 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 15$  s

En la figura 6.1 se observan los perfiles de colgamiento de agua a  $t = 15$  s después de el cierre de las válvulas que se encuentran en los extremos de la tubería\*. Se observa que el modelo sobrestima el colgamiento del agua en el extremo superior de la tubería. La diferencia máxima, existente entre los valores de colgamiento medidos y predichos es de 7%.

\* El punto  $x/L = 0$  corresponde al extremo inferior de la tubería y  $x/L = 1$  corresponde al extremo superior de la tubería.

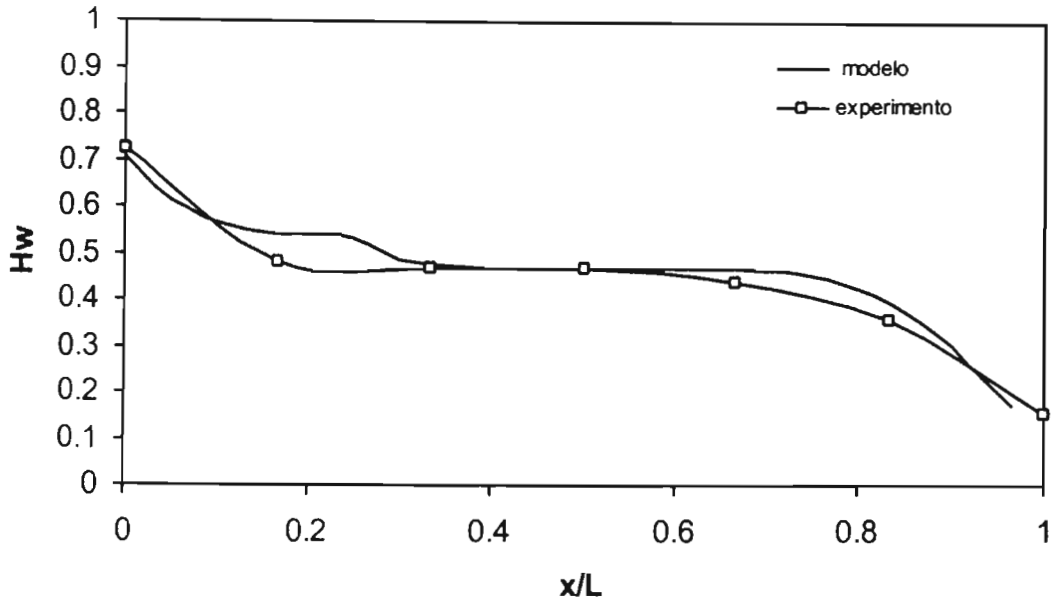


Figura 6.2 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 30$  s

En la figura 6.2 se muestran los perfiles de colgamiento de agua a  $t = 30$  s, los perfiles calculados prácticamente coinciden con los perfiles medidos. La excepción es una parte de la tubería cercana al extremo izquierdo ( $x/L=0.2$ ), donde el modelo sobrestima el colgamiento del agua. La diferencia máxima, entre los colgamientos calculados y medidos es de 7%.

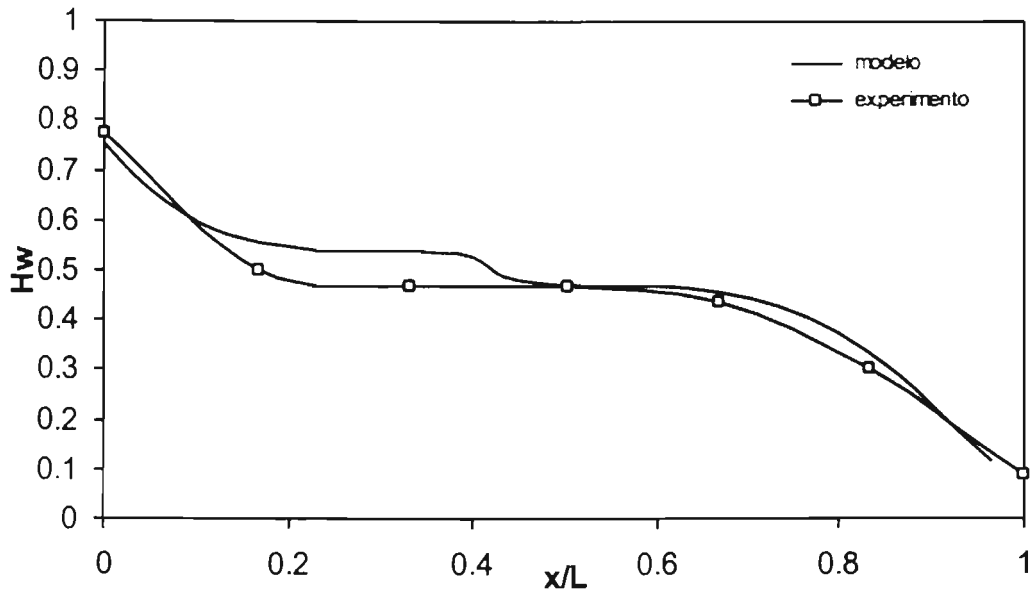


Figura 6.3 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 45$  s

A los 45s de haber iniciado la prueba, se observa en. La figura 6.3 muestra la comparación de los perfiles de colgamiento de agua para  $t = 45$  s. La discrepancia entre los valores calculados y experimentales menor al 4%, en la región de  $x/L$  entre 0.1 a 0.45. Desde el centro hasta el final de la tubería, el modelo predice con buena aproximación el colgamiento de agua.



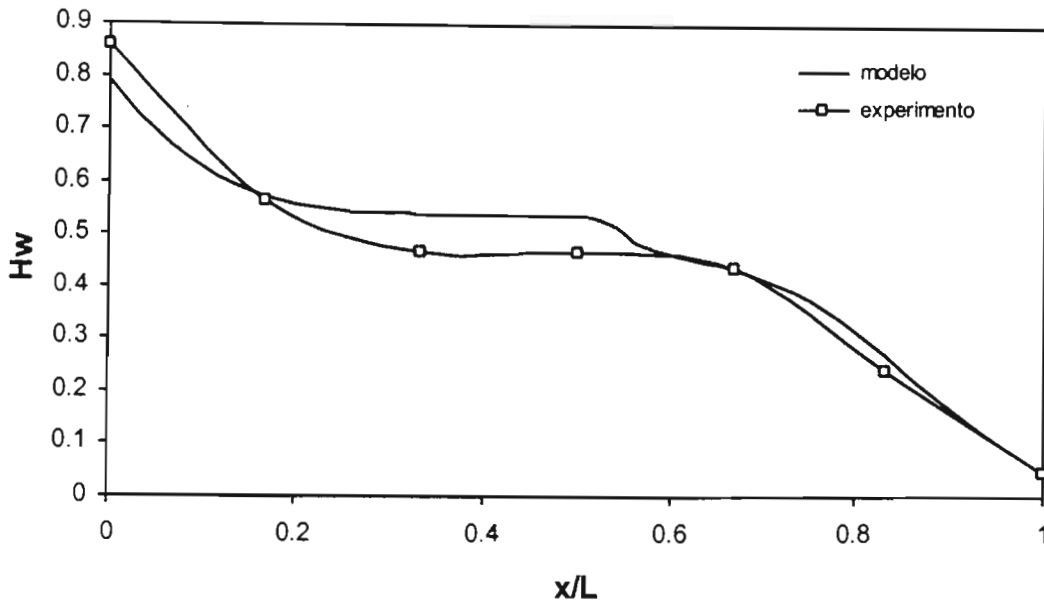


Figura 6.4 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 60$  s

En la figura 6.4 se observan los perfiles de colgamiento de agua a  $t = 60$  s. El modelo sobreestima el colgamiento de agua en la región de la tubería entre  $x/L = 0.2$  y  $0.55$  menor al 8%. En la región adyacente al extremo superior ( $x/L > 0.6$ ) los perfiles prácticamente coinciden.

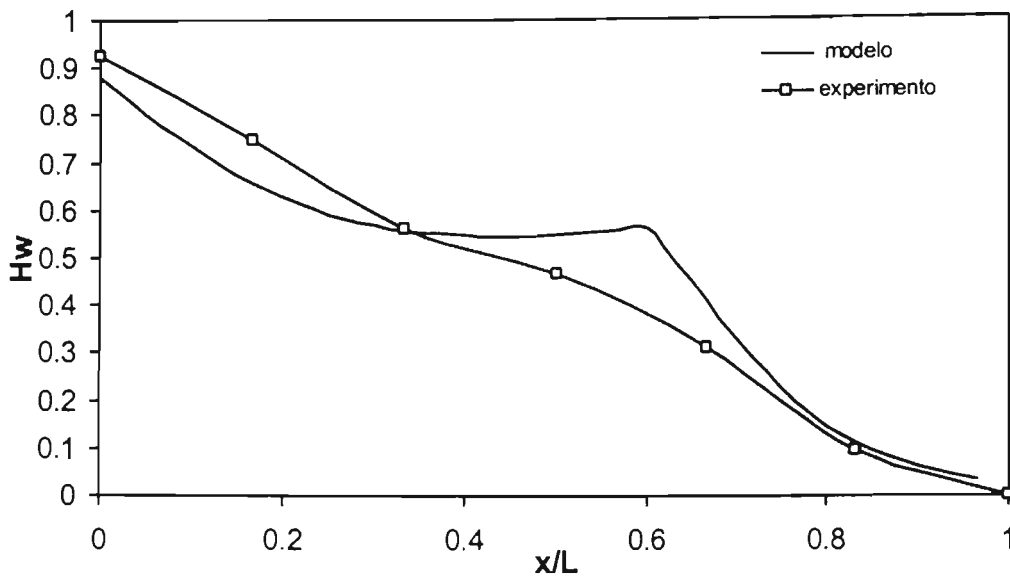


Figura 6.5 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 120$  s

A  $t = 120$  s (figura 6.5) el modelo predice un incremento considerable de colgamiento en  $x/L=0.6$ , lo que difiere del perfil obtenido experimentalmente. Sin embargo el perfil experimental tiene también un aumento ligero de colgamiento en la misma sección de la tubería. El modelo subestima el colgamiento de agua desde la parte baja de la tubería (a la izquierda del perfil), hasta el punto  $x/L= 0.25$  donde hace intersección con el perfil experimental. A partir de este punto el modelo sobrestima el colgamiento de agua hasta  $x/L=0.75$ . La discrepancia máxima, entre los perfiles es de 15%.

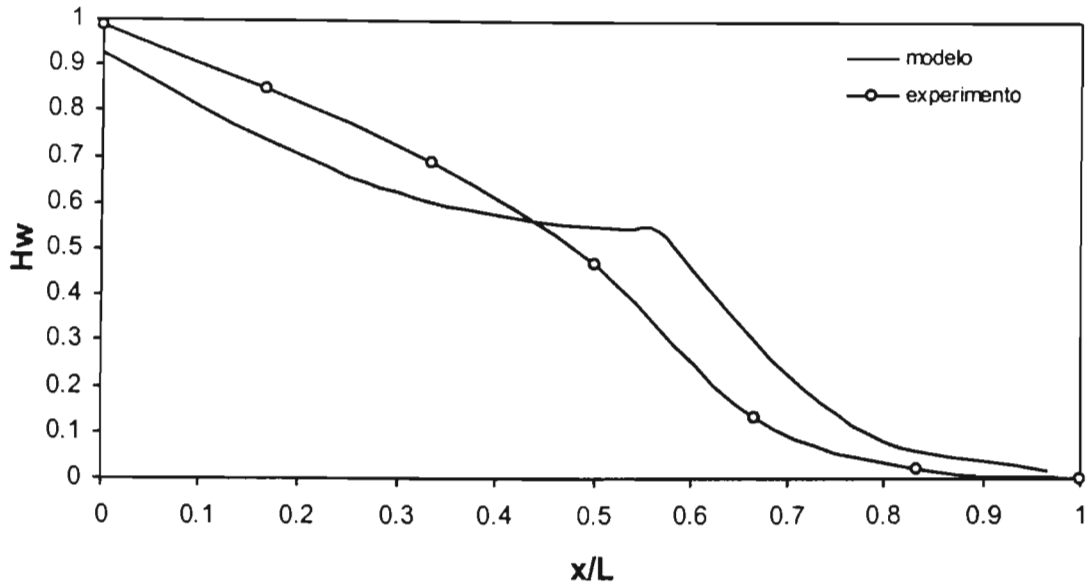


Figura 6.6 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 180$  s

Los perfiles de colgamiento de agua calculado y experimental a  $t = 180$  s, se muestran en la figura 6.6. Los perfiles muestran tendencias similares, con una discrepancia del colgamiento de agua de 12%. El modelo subestima el colgamiento de agua para la parte baja de la tubería, hasta el punto  $X/L = 0.45$  donde hace intersección con el perfil experimental, a partir de este punto el modelo sobrestima el colgamiento de agua hasta la parte alta de la tubería. La discrepancia máxima, entre los valores de colgamiento de agua calculados y los valores de colgamiento de agua experimentales para  $t = 180$  s es de 20%.

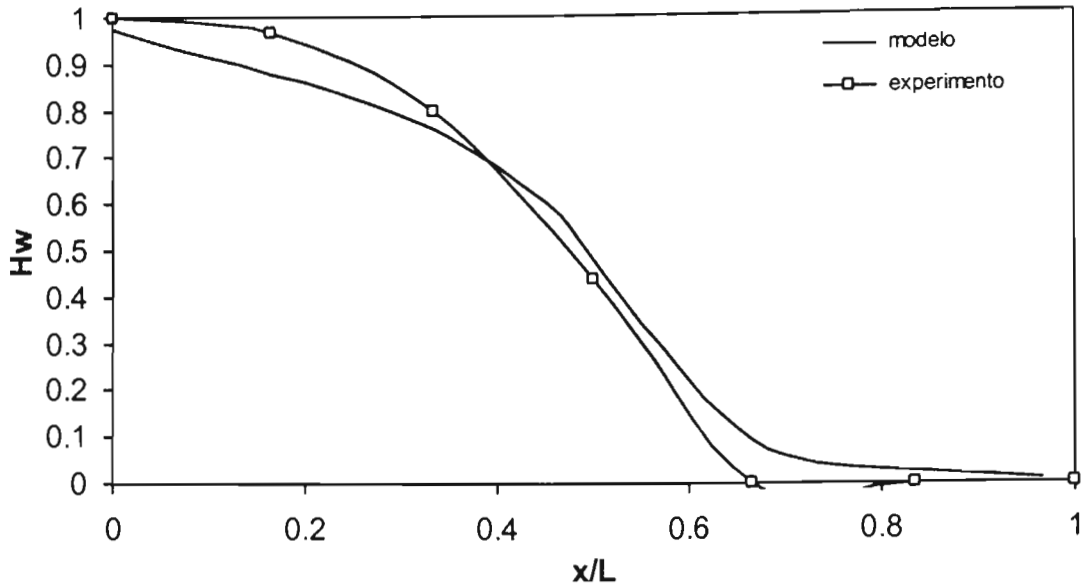


Figura 6.7 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 360$  s

En la figura 6.7 se observan los perfiles de colgamiento de agua a  $t = 360$  s después del cierre de las válvulas. Los perfiles prácticamente coinciden en toda su longitud. La línea inclinada que está al centro de los dos perfiles representa la interfase agua aceite, la cual se extiende desde  $X/L=0.30$  hasta  $X/L=0.65$ . Los datos indican que el extremo derecho ( $0.65 < x/L < 1$ ) está lleno con aceite. El modelo predice que una pequeña parte del agua ( $< 2\%$ ) todavía permanece en la parte alta de la tubería ( $0.8 < x/L < 1$ ).

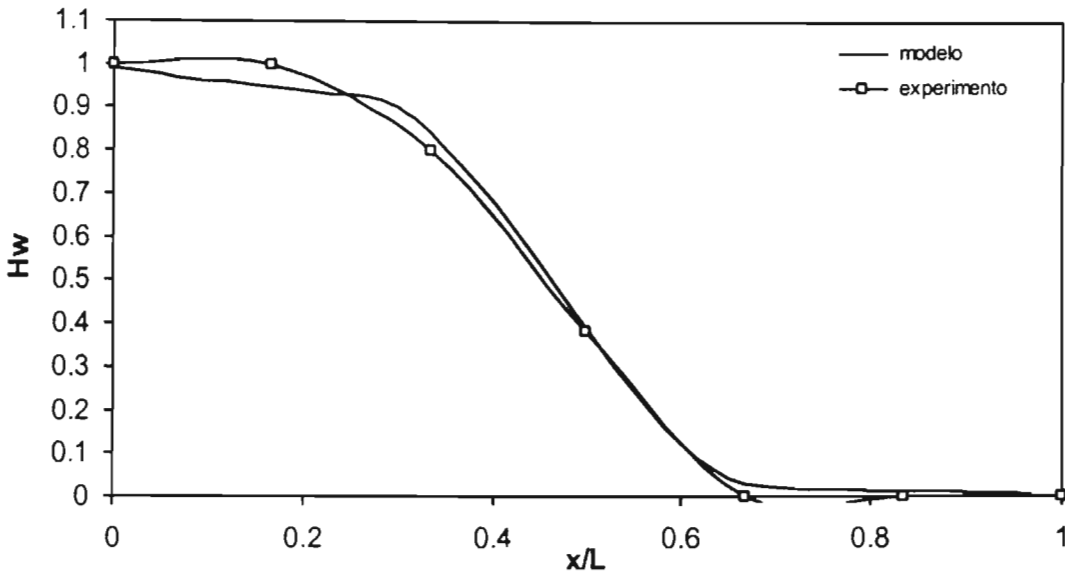


Figura 6.8 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 720$  s .

Los perfiles a  $t = 720$  s se muestran en la figura 6.8. Los perfiles corresponden a una condición estacionaria, lo que indica que la redistribución de fases ha finalizado. Se observa al inicio de los perfiles diferencias máximas del colgamiento del agua de 4%. Se observa que las diferencias máximas entre los valores experimentales y calculados del colgamiento del agua son menores al 4%.

## 6.2 Comparación de los perfiles transitorios del colgamiento de agua de la segunda prueba

Como ya se ha descrito en los capítulos cuatro y cinco, esta segunda prueba se realizó en una tubería ligeramente inclinada ( $\beta=0.35^\circ$ ), con un colgamiento de agua de 15%.

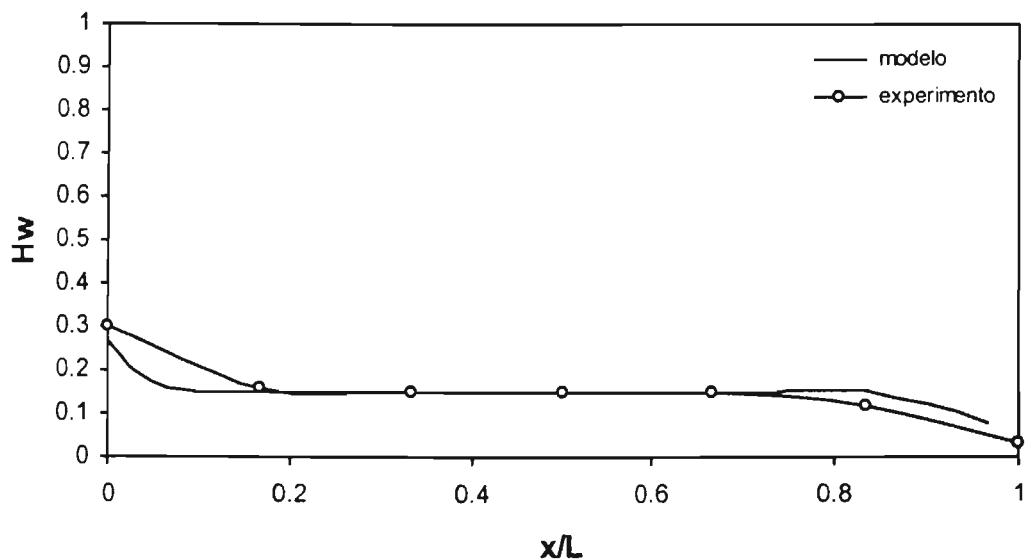


Figura 6.9 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 15$  s

En la figura 6.9 se observan los perfiles de colgamiento de agua a  $t = 15$  s después de iniciarse el flujo contracorriente. Los perfiles prácticamente coinciden, especialmente en los extremos donde se aprecia claramente el reacomodo de las fases, por efectos del flujo contracorriente. La discrepancia máxima observada entre los perfiles de 8%.

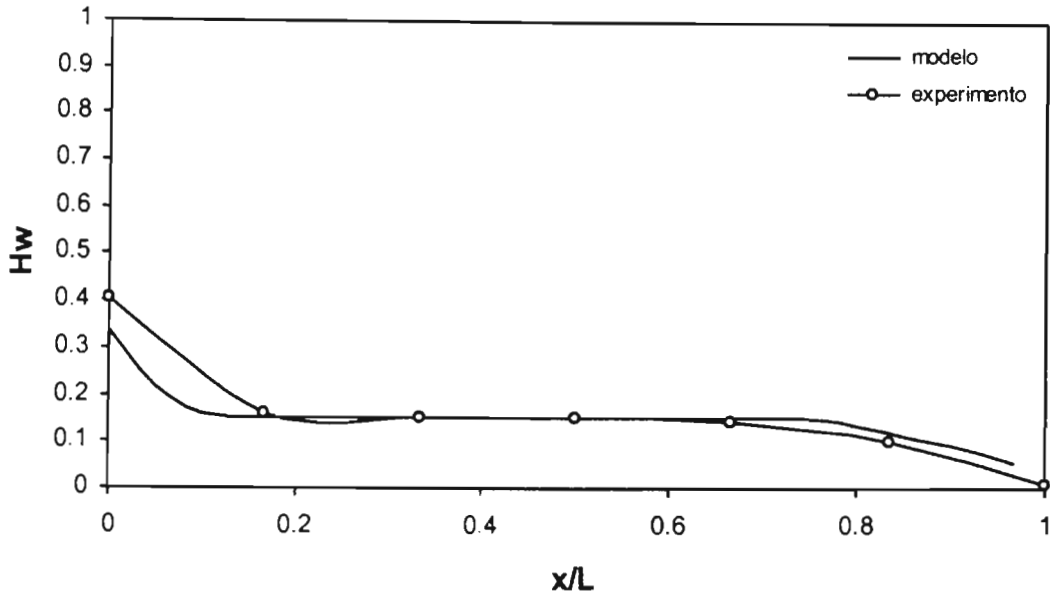


Figura 6.10 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 30$  s

En la figura 6.10 se muestran los perfiles de colgamiento de agua a  $t = 30$  s. Los perfiles calculados prácticamente coinciden con los perfiles medidos. En los extremos de los perfiles calculados se observa la coincidencia con los valores obtenidos experimentalmente. En la parte baja (inicio de la tubería) se observa una discrepancia de 6% y en la parte alta (final de la tubería) la discrepancia es de 3%.

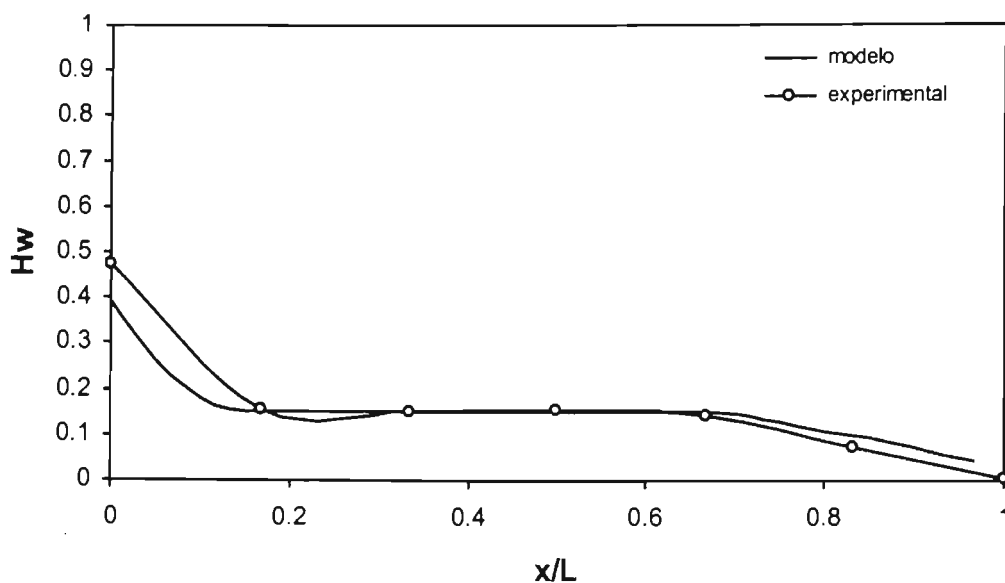


Figura 6.11 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 45$  s

Al inicio de la figura 6.11 se muestra la comparación de los perfiles de colgamiento de agua para  $t = 45$  s. El perfil del modelo subestima el colgamiento del agua, desde  $x/L=0$  hasta  $x/L=0.18$ , esta sección está comprendida dentro de la parte baja de la tubería en estudio y es sobrestimada desde  $x/L=0.65$  hasta  $x/L=1.00$ , que corresponde a la parte alta de la tubería. La discrepancia máxima que se puede observar al inicio y la final de la tubería es de 10% y 3% respectivamente.



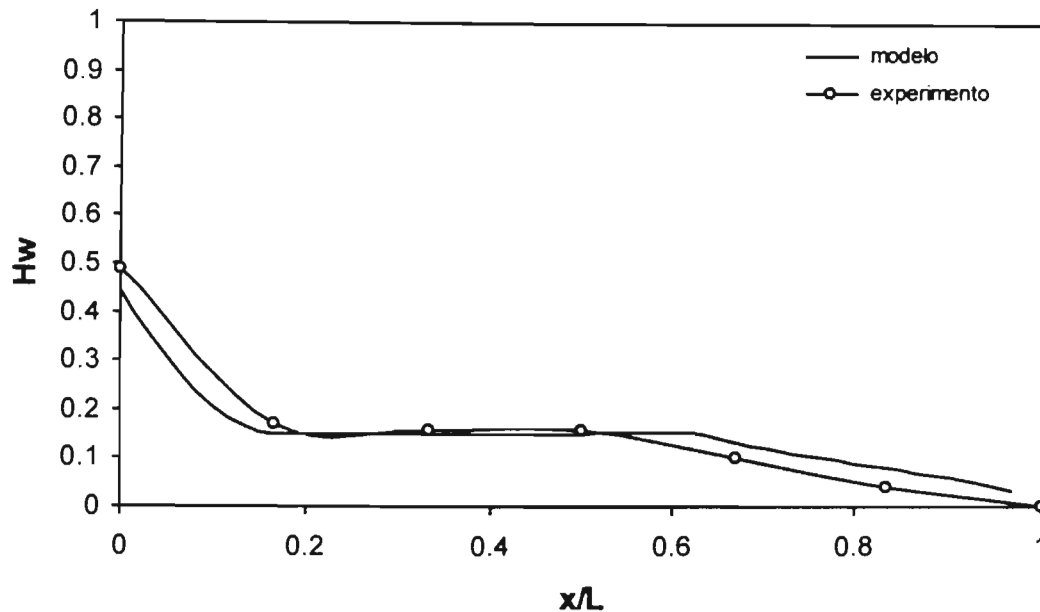


Figura 6.12 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a los 60 s

En la figura 6.12 se observan los perfiles de colgamiento de agua a  $t = 60$  s después de iniciarse el flujo contracorriente. Los perfiles muestran una forma similar en toda su longitud. El perfil del modelo subestima el colgamiento agua, desde  $x/L=0$  hasta  $x/L=0.20$ , esta sección esta comprendida dentro de la parte baja de la tubería en estudio y sobrestima el calculo desde  $x/L=0.6$  hasta  $x/L=1$ , que corresponde a la parte alta de la tubería. La discrepancia máxima que se puede observar entre los perfiles es de 5%.

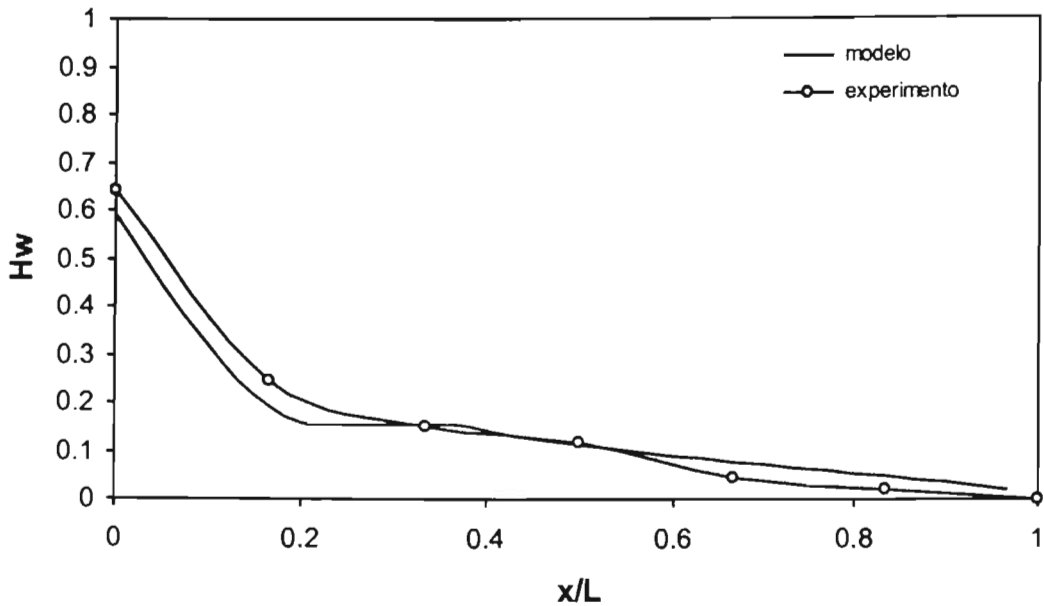


Figura 6.13 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 120$  s

A  $t = 120$  s (figura 6.13) los perfiles muestran una forma similar en toda su longitud, especialmente en el extremo izquierdo, que corresponde a la parte baja de la tubería, siendo esta sección la que se llena lentamente de agua. La diferencia máxima entre los dos perfiles de colgamiento de agua es de 5%, por lo que el modelo predice de manera muy acertada el flujo contracorriente de dos fluidos inmiscibles para un colgamiento inicial de agua de 15%.

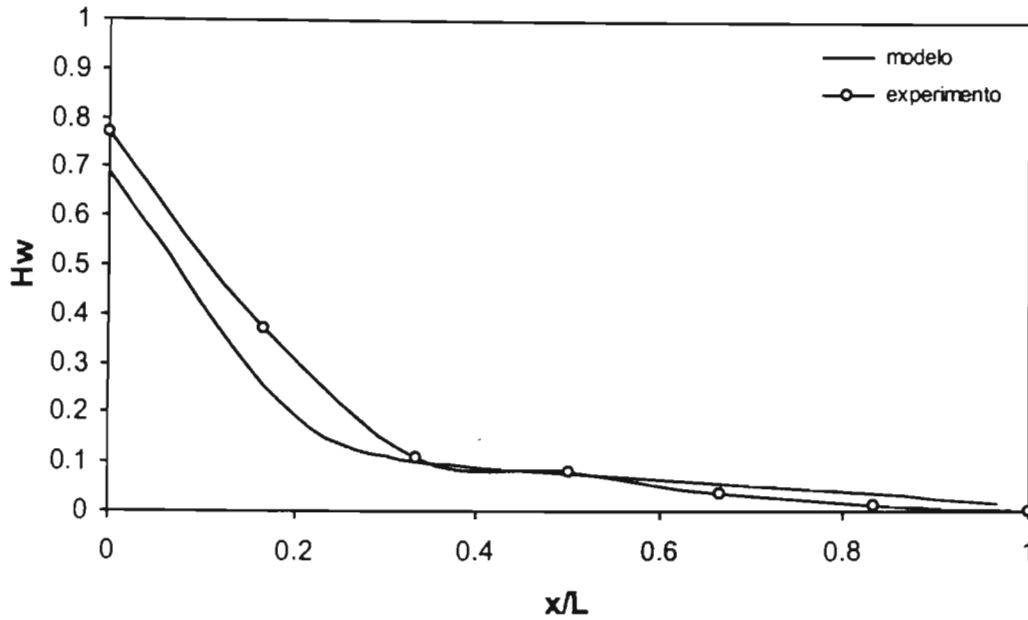


Figura 6.14 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 180$  s

Los perfiles de colgamiento de agua calculado y experimental a  $t = 180$  s se muestra en la figura 6.14. Los dos perfiles muestran una línea cercana a la horizontal en la parte alta de la tubería que indica que el flujo contracorriente está por finalizar. El modelo muestra una forma similar en toda su longitud, especialmente en los extremos donde se aprecia claramente el acomodamiento de las fases, por efectos del flujo contracorriente. A partir de  $t = 180$  s la forma de los perfiles no muestran cambios significativos. La discrepancia máxima, entre los valores de colgamiento de agua calculados y los valores de colgamiento de agua experimentales para  $t = 180$  s son menores al 8%.

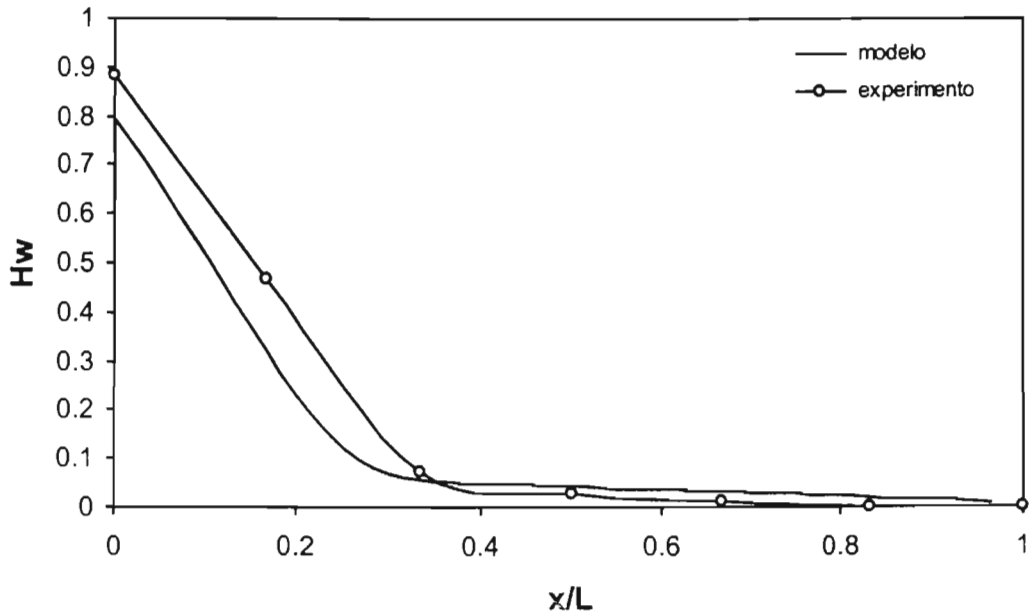


Figura 6.15 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 360$  s

En la figura 6.15 se observan los perfiles de colgamiento de agua a  $t = 360$  s después de el cierre de las válvulas que están en los extremos de la tubería. Desde el inicio hasta  $x/L = 0.30$  los perfiles muestran una diferencia de 9% en sus valores y coinciden en el intervalo comprendido entre  $0.3 < x/L < 1$  en el que la tubería esta llena de aceite, con una discrepancia entre perfiles de 3%.

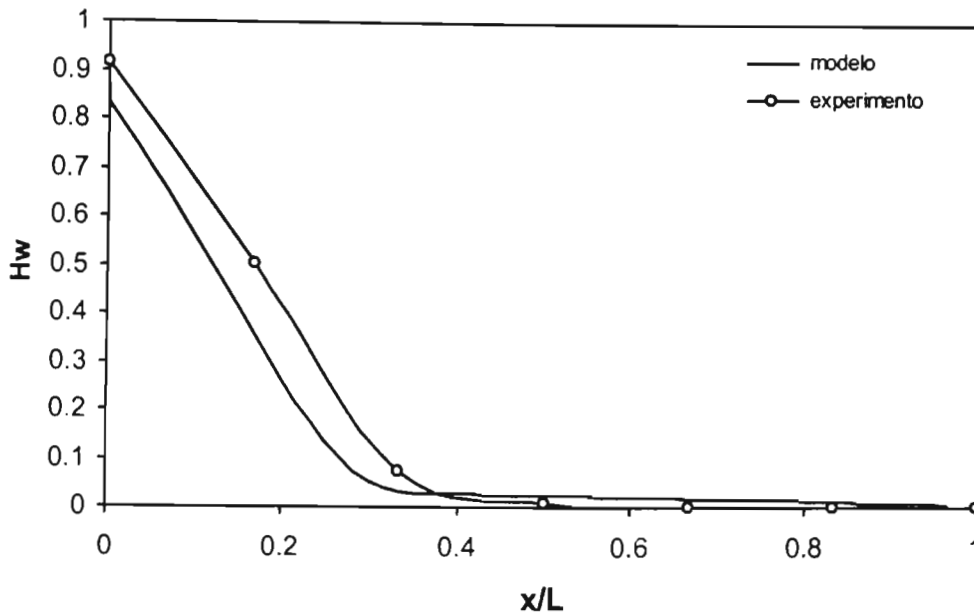


Figura 6.16 Comparación de los perfiles calculados y medidos de colgamiento de agua a  $t = 720$  s.

Los perfiles a  $t = 720$  s, se muestra en la figura 6.16. Los perfiles corresponden a una condición estacionaria, lo que indica que la redistribución de fases ha finalizado. Se observa al inicio de los perfiles diferencias máximas del colgamiento del agua de 10%.

En los anexos A y B se presentan las comparaciones de las variaciones de colgamiento del agua calculados contra las variaciones del colgamiento del agua obtenidas experimentalmente para la primera y segunda prueba respectivamente.

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **7.1 Conclusiones**

Se obtuvieron datos experimentales sobre el flujo contracorriente transitorio de dos líquidos inmiscibles en una tubería inclinada. Los datos obtenidos fueron comparados con predicciones hechas por el modelo matemático. Se mostró que el modelo predice con una exactitud aceptable (93%) la variación de colgamiento de agua en la tubería.

Se diseñó y construyó una instalación experimental que está formada por una tubería de 3 plg de diámetro con 70m de longitud, para estudiar experimentalmente el flujo contracorriente transitorio de dos fluidos inmiscibles.

La instalación de flujo multifásico se diseñó para que los fluidos de trabajo circulen de forma continua ó de forma intermitente.

Se diseñaron soportes que pueden sostener a la tubería de experimentación en ángulos desde  $-5^\circ$  hasta  $+5^\circ$  y en configuraciones quebradas.

De un grupo de 8 tipos de aceite, se seleccionó el aceite a utilizar para realizar las pruebas de flujo contracorriente de dos líquidos inmiscibles. Se seleccionó un aceite de baja viscosidad, no emulsificante y no dañino al contacto con la piel.

La instalación se construyó para realizar el estudio de los diferentes tipos de flujos multifásicos existentes.

Se diseñó un método para efectuar la medición del colgamiento del agua, que consiste en una graduación en la tubería transparente para leer la altura de la interfaz (agua-aceite) y una corrección a la lectura realizada.

Se diseñó y construyó un separador tipo trifásico a partir de un tanque industrial de polietileno.

Se diseñó un sistema de válvulas para controlar el flujo en la instalación, mediante el uso de pasos alternos y válvulas de estrangulamiento.

## **7.2 Contribuciones**

Se obtuvieron datos experimentales únicos sobre flujo transitorio contracorriente de dos líquidos inmiscibles.

Se confirmó que el fenómeno de distribución de fases es controlado por la propagación de ondas no lineales de colgamiento de agua.

Se mostró que el modelo de dos fluidos puede ser utilizado para simular flujo contracorriente de dos líquidos inmiscibles con una exactitud aceptable (93%).

## **7.3 Recomendaciones para trabajos futuros**

Realizar pruebas de flujo contracorriente de dos fases, originado por una distribución de fases inicial uniforme, a lo largo de la sección de prueba, para diferentes ángulos de la tubería y para diferentes colgamientos iniciales de agua.

Realizar pruebas para el estudio del fenómeno de flujo contracorriente de dos fases, para diferentes ángulos de inclinación, ocasionado por la distribución inicial no uniforme de las fases en la sección de prueba.

Para mejorar el funcionamiento de la instalación experimental es necesario que se cambien las bombas centrifugas por bombas de cavidades progresivas, con el objetivo de no crear emulsiones finas que dificultan la visibilidad de fenómeno multifásico a través de la tubería transparente de PVC.



Para la medición de los gastos, hay que reducir el diámetro de los tubos donde se insertan los medidores de flujo, para poder realizar lecturas de gastos inferiores a 0.5 l/s y obtener así mayor exactitud en las lecturas realizadas por el medidor de flujo a gastos bajos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- J. L. Trallero, Cem Sarica y J.P.Brill.: "A Study of Oil / Water Flow Patterns in Horizontal Pipes," SPE Production & Facilities, Agosto 1997, 165-171.
- 2.- Prince, R., Thomas,C.: "Novel design concept and operational enhancements of vessel-type slug catchers for mutiphase transfer al the theddlethorpe terminal," Multiphase technology, BHR Group Conferences series, Publicación N°.31, 1998
- 3.- Yuri V. Fairuzov.: "Transient gravity-driven countercurrent two-phase liquid-liquid flow in horizontal and inclined pipes," International Journal of Multiphase Flow, Julio, 2003, 1759-1769.

- 4.- Jacob H. Masliyah y C. A. Shook.: "Two-phase Laminar Zero Net Flow in a Circular Inclined Pipe," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 6, Abril 1978, 165-177.
- 5.- Wallis, J.L.: "Review-theoretical models of gas-liquid flows," *ASME J. Fluids Eng.*, 1982, 279-283.
- 6.- Yehuda Taitel y A. E. Dukler.: "A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow", *AICHE Journal*, vol. 22 N°1, Enero 1976, 47-55.
- 7.- Banu Alkaya, Subash S. Jayawardena, James P. Brill.: "Oil-Water Flow Patterns in slightly Inclined Pipes," *ETCE/OMAE, 2000 Join Conference Energy for the New Milenium*, Febrero 14-17 2000, 8.
- 8.- Liang-Biao Ouyang.: "Prediction of the Occurrence of Oil-Water Countercurrent Flow in Deviated Wells," *Petroleum Science and Technology*, Vol 21, 2003, 1101-1120.
- 9.- Liang-Biao Ouyang.: "Modeling Oil-Water Countercurrent Flow in Deviated Wells Using Mechanistic and Simplified Approaches," *Petroleum Science and Technology*, Vol 21, 2003, 1121-1143.
- 10.- A. Ullmann, M. Zamir, Z. Ludmer y N. Brauner.: "Stratified laminar countercurrent flow liquid phases in inclined tubes," *International Journal of Multiphase Flow*, Julio, 2003, 1583-1604.
- 11.- H. Dale Beggs y James P. Brill.: "A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes," *Journal of Petroleum technology*, Mayo 1973, 607-617.

- 12.- P. Angeli y G.F. Hewitt.: "Flow Structure in horizontal Oil-Water Flow," International Journal of Multiphase Flow, Julio 1999, 1117-1140.
- 13.- Brauner, N., Maron, D.M.: "Stability analysis of stratified liquid-liquid flow," Int. J. Multiphase Flow 18,1992, 103-121.
- 14.- Taitel, Y., Barnea, D.: "Simplified transient simulation of two phase flow using quasi-equilibrium momentum balances," Int. J. Multiphase Flow 23, 1997,493-501.
- 15.- Kart Gieck .: "Manual de formulas Técnicas," 1993, b3
- 16.- "Policy on Reporting Uncertainties in Experimental Measurements and Results," Journal of Heat Transfer

**ANEXO A****Comparación de la variación del colgamiento de agua  
de la primera prueba**

En las figuras A1 – A7 se presentan las comparaciones de las variaciones del colgamiento de agua calculados contra las variaciones del colgamiento del agua obtenidas experimentalmente en siete puntos a lo largo de la tubería. En la primera prueba el colgamiento inicial de agua fue de 50%. Se debe observar que el modelo predice las variaciones de colgamiento con una exactitud satisfactoria de 93%.

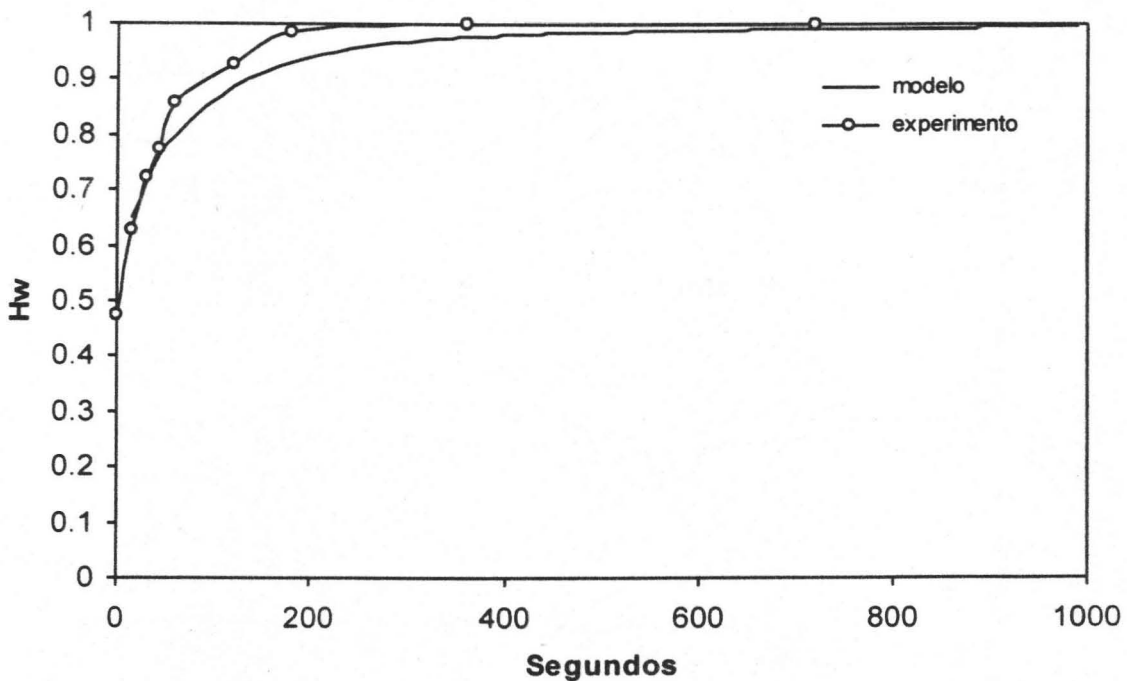


Figura A1 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0$

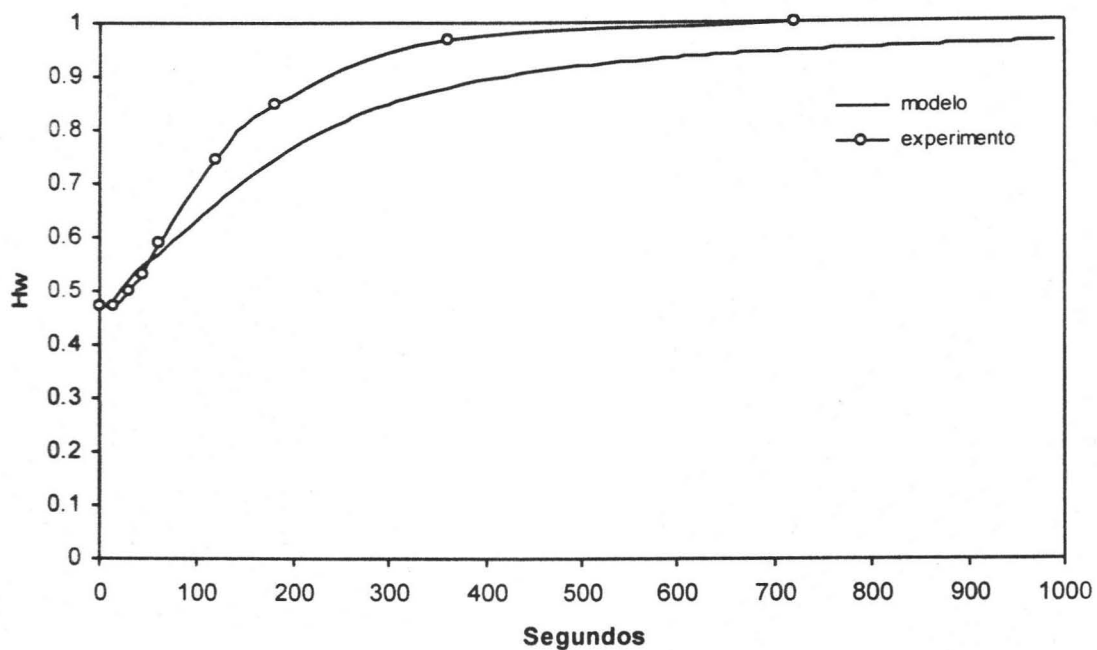


Figura A2 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.16$

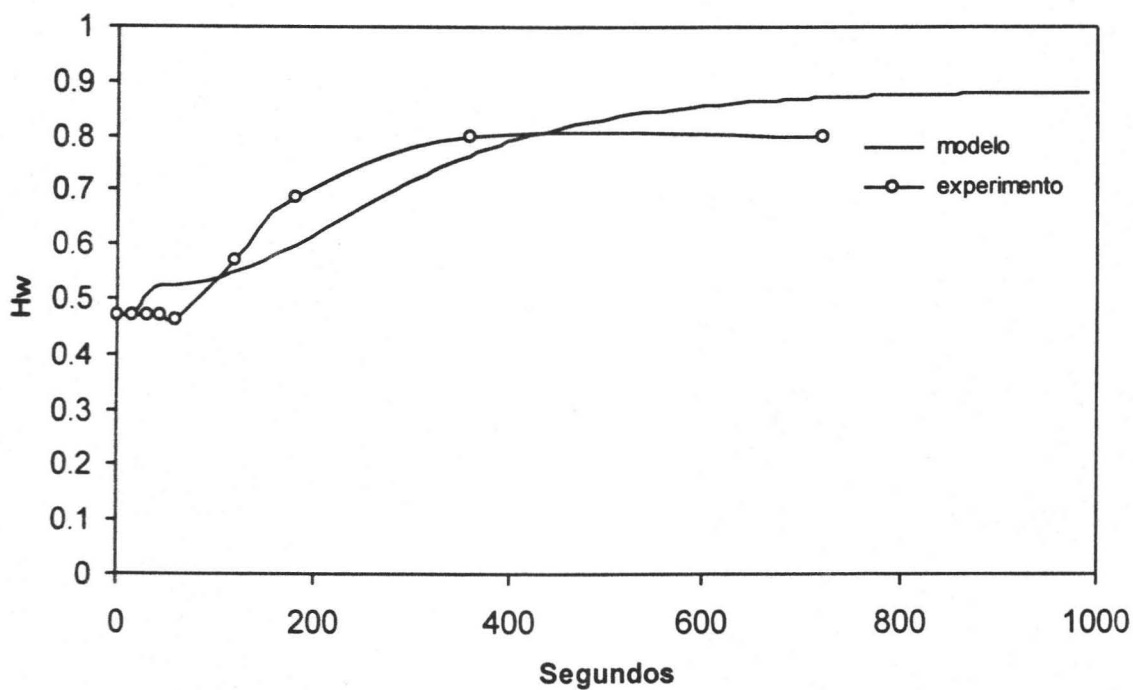


Figura A3 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.33$

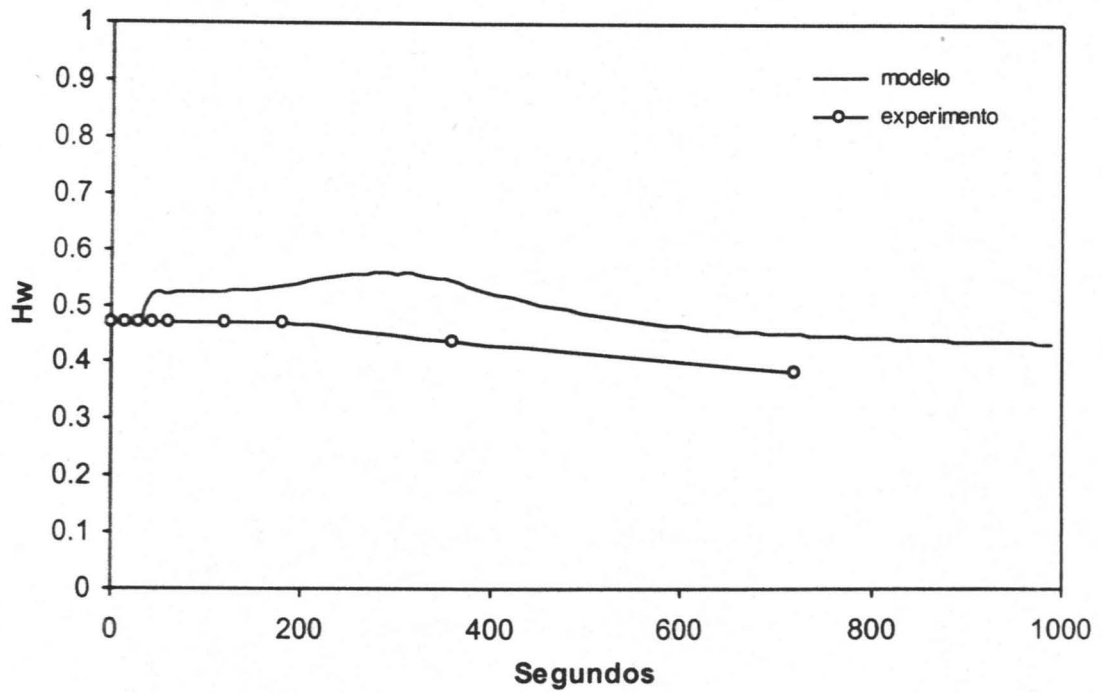


Figura A4 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.50$

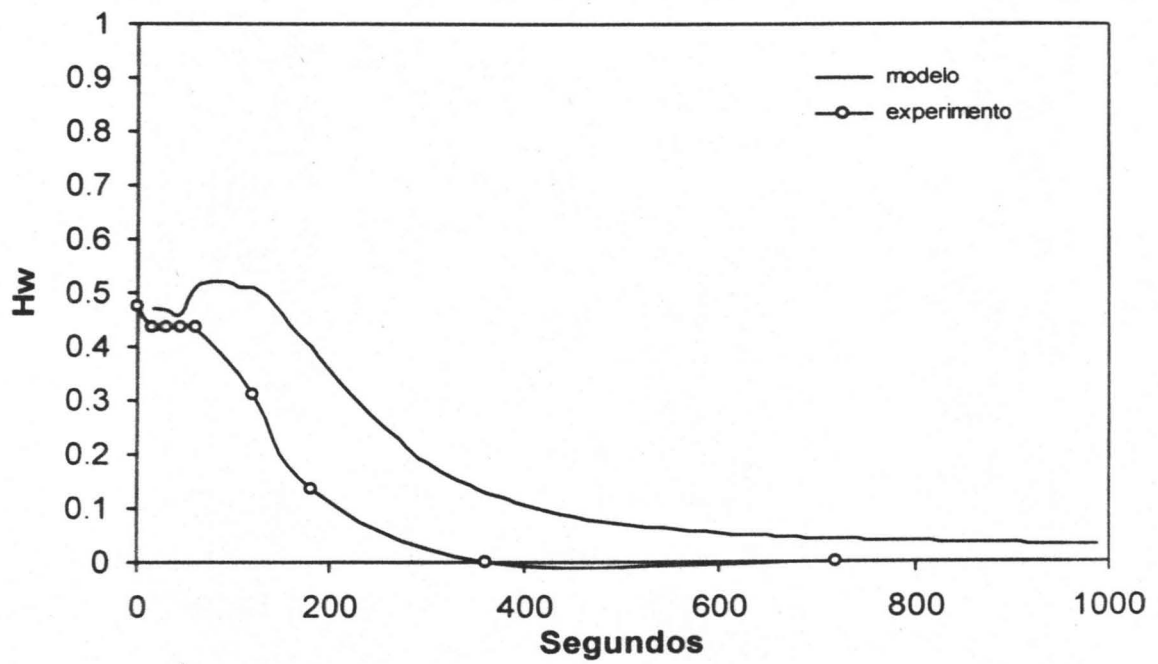
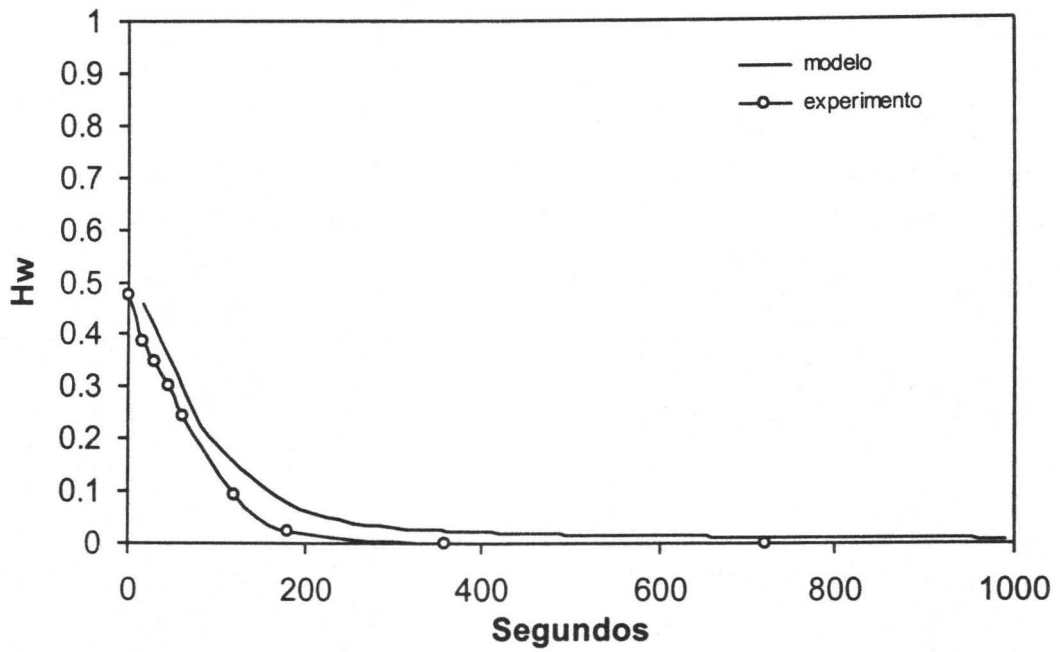
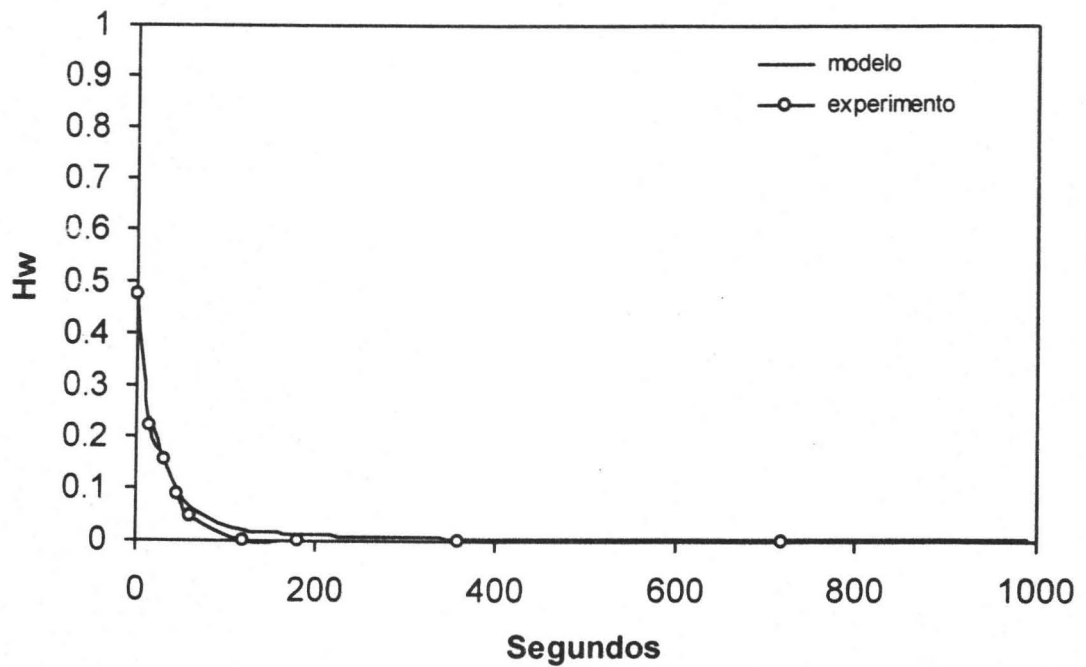


Figura A5 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.66$

Figura A6 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.83$ Figura A7 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=1.00$



## ANEXO B

**Comparación de la variación del colgamiento de agua  
de la segunda prueba**

En las figuras B1 – B7 se presentan las comparaciones de las variaciones del colgamiento de agua calculados contra las variaciones del colgamiento del agua obtenidas experimentalmente en siete puntos a lo largo de la tubería. En la segunda prueba el colgamiento inicial de agua fue de 15%. Se debe observar que el modelo predice las variaciones de colgamiento con una exactitud satisfactoria de 93%.

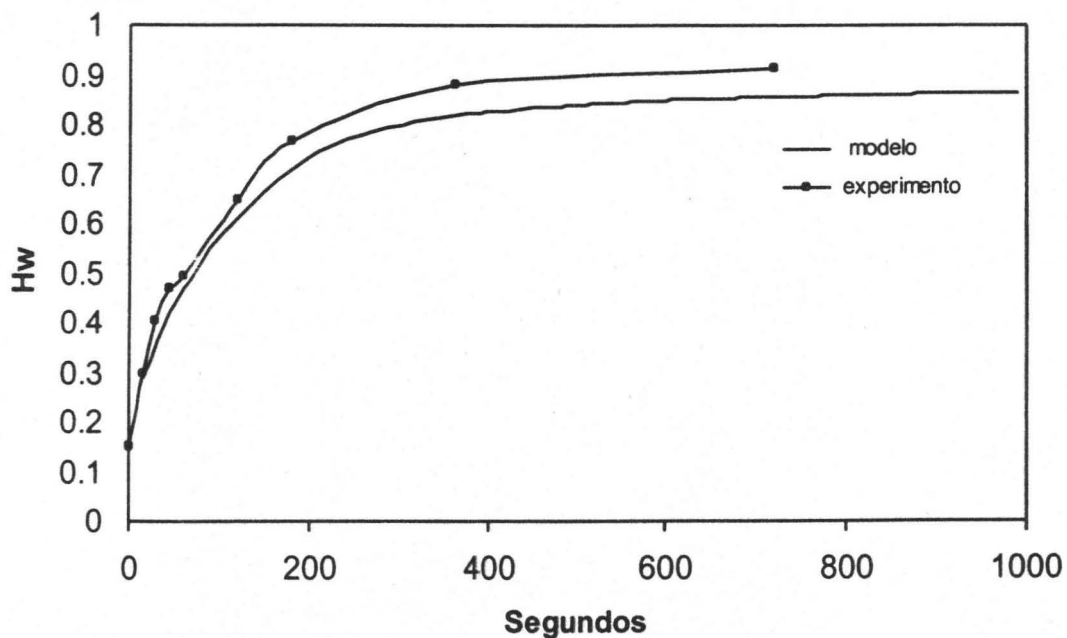


Figura B1 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.00$

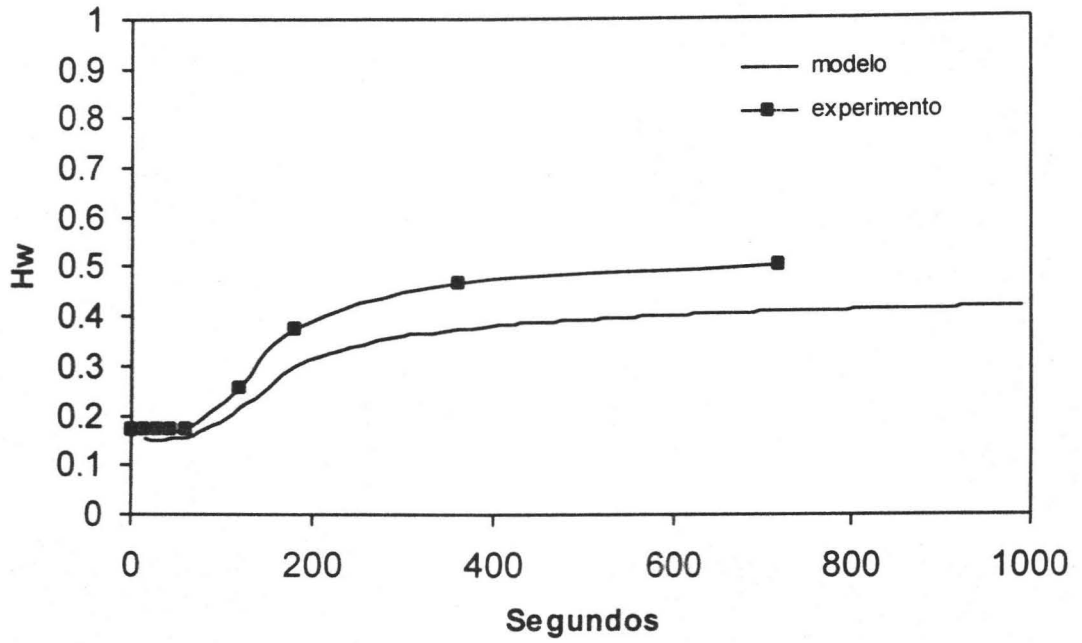


Figura B2 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.16$

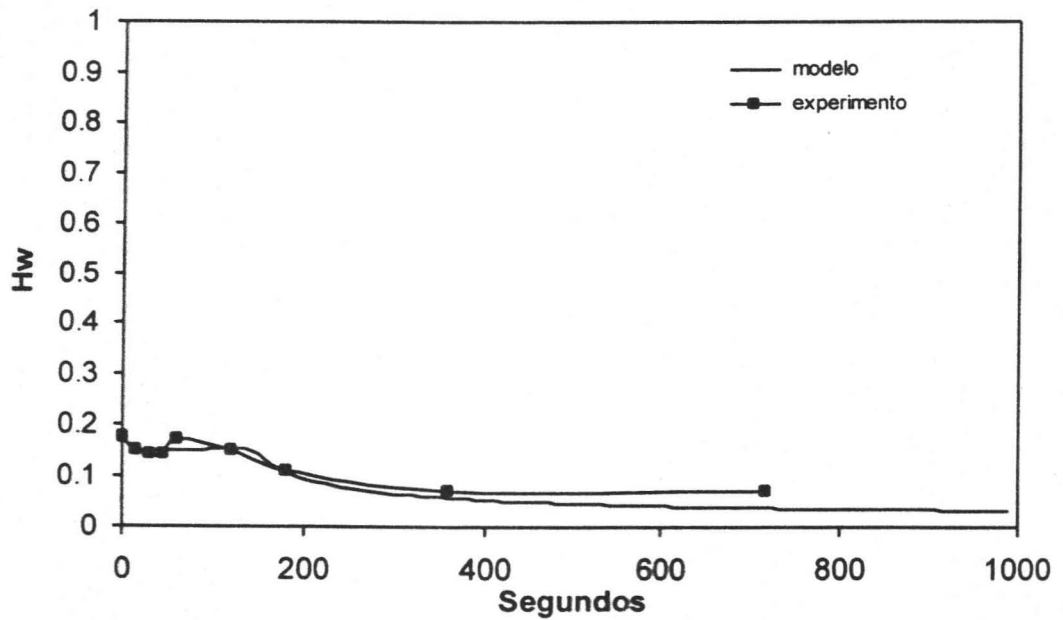


Figura B3 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.33$

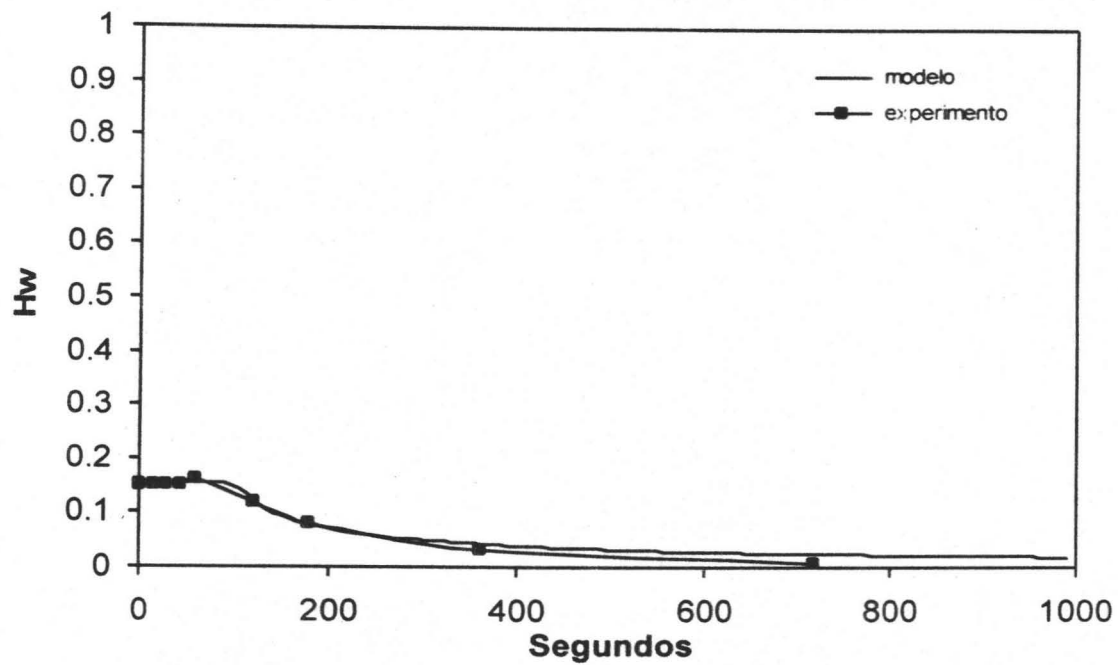


Figura B4 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.50$

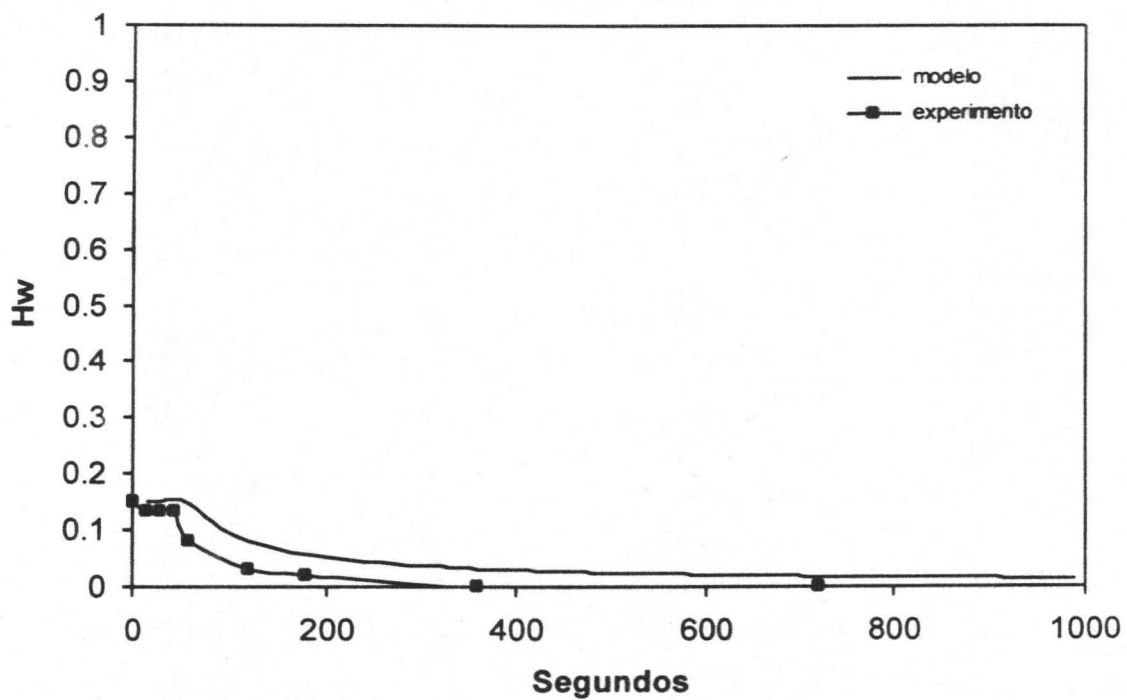


Figura B5 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.66$

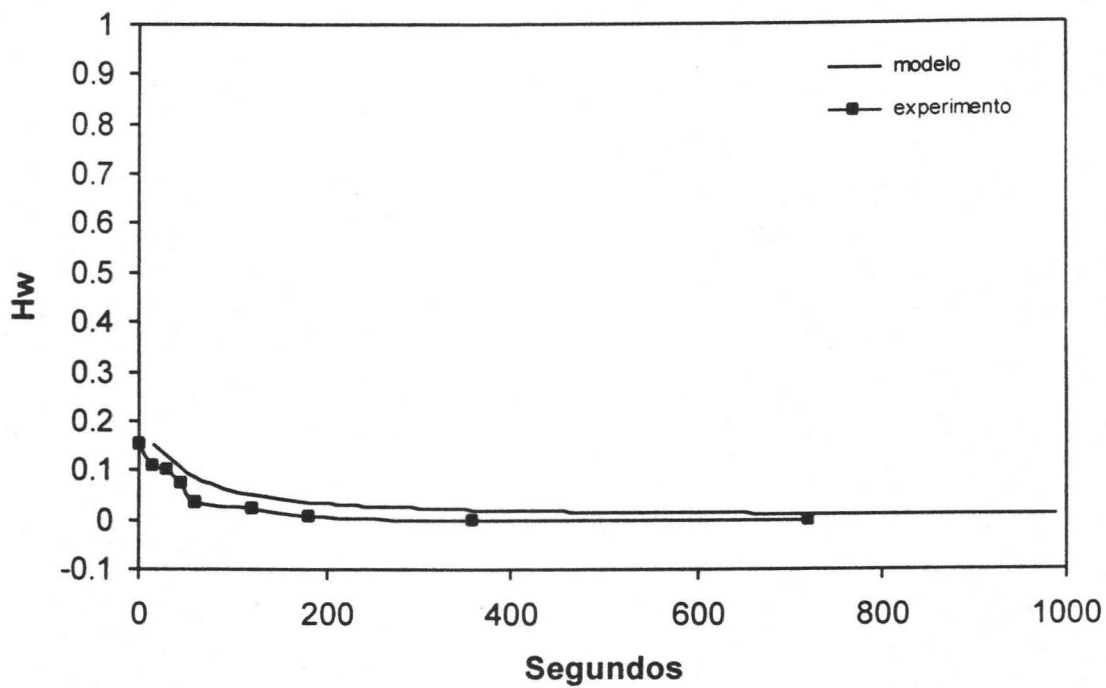


Figura B6 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=0.83$

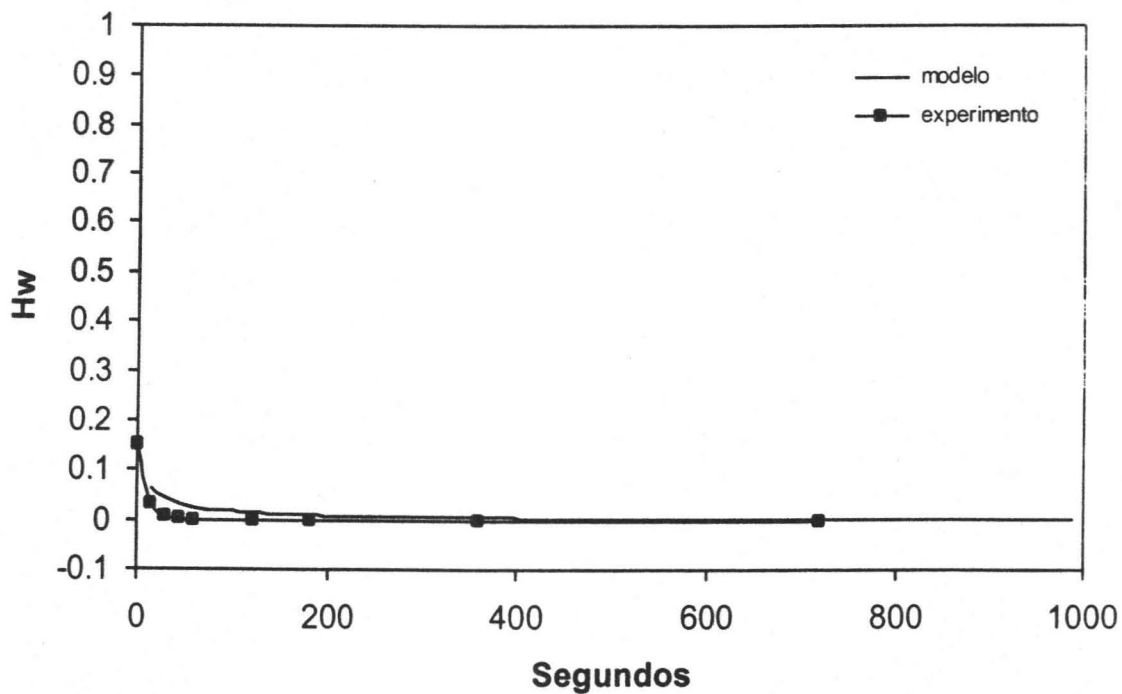


Figura B7 Variación del colgamiento de agua en  $X/L=1.00$