

00378

UNAM  
POSGRADO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

CIENCIA E INGENIERIA  
DE MATERIALES

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERIA DE MATERIALES  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

ESTUDIO DE LA VELOCIDAD FLUCTUANTE DE LA FASE  
CONTINUA DE UNA MEZCLA GAS - LIQUIDO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIA  
E INGENIERIA DE MATERIALES

P R E S E N T A :

CARLOS ALBERTO PALACIOS MORALES



DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ROBERTO ZENIT CAMACHO

MEXICO, D. F.

2005

m 345714



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

Estudio de la velocidad fluctuante de la fase continua en  
una mezcla gas-líquido

**Carlos Alberto Palacios Morales**  
Instituto de Investigaciones en Materiales  
Universidad Nacional Autónoma de México

Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales  
Director de tesis: Dr. Roberto Zenit Camacho

junio de 2005



A mis padres: Laura y Hernán.  
Por todo su amor y apoyo incondicional.



# Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Investigaciones en Materiales por darme la posibilidad de crecer en todos los ámbitos profesionales y personales. Terminé exitosamente este nuevo ciclo, concluyo con satisfacción, orgullo y nostalgia porque la Universidad me ha dejado grandes experiencias y me ha dado la oportunidad de conocer gente muy valiosa.

Agradezco infinitamente a toda mi familia en general. A mis padres, Hernán Palacios Sarmiento, Laura Hermila Morales, quienes me han apoyado en todos estos años, agradezco su paciencia, su dedicación y, en general, porque sin ellos nada de esto sería posible. A mis hermanos Yanni y Hernán, por su compañía y apoyo.

Agradezco a mi tutor Roberto Zenit, por darme la oportunidad de trabajar en un proyecto interesante, por todos sus consejos en la elaboración de esta tesis, por toda su enseñanza, y por inculcar en mí el interés en la investigación y en la mecánica de fluidos. En particular quiero mencionar la valiosa ayuda de mi colega Julián Martínez con el cual realicé la mayoría de los experimentos preliminares del presente trabajo. A los miembros del jurado, los doctores Francisco Solorio, Guadalupe Huelsz, Catalina Stern y Jaime Cervantes, agradezco sus comentarios, críticas y el enriquecimiento general al presente trabajo. Agradezco al CONACYT y al programa de Movilidad de Estudiantes de Posgrado de la UNAM las becas que me otorgaron para poder realizar este proyecto. Agradezco a todos los que directa o indirectamente contribuyeron a la elaboración de la presente tesis.

Agradezco a los doctores Roberto Zenit, Guillermo Pulos y Juan Hernández por hacer el trabajo en el Instituto muy agradable. A todos mis compañeros y colegas de mi vida universitaria, cuya lista es grande, por su compañía, apoyo y por todos los ratos inolvidables. A mis amigos de toda la vida, Lina, Fabiola, Paty, Daniel, Angel y Nacho que siempre han creído en mí, han estado y siempre estarán en los momentos importantes de mi vida.



# Resumen

En esta tesis se estudió experimentalmente la agitación de la fase líquida de una suspensión monodispersa de burbujas milimétricas ascendiendo en un canal vertical. La agitación es un parámetro de gran importancia para la utilización práctica de este tipo de flujos. Esta medición es equivalente a la intensidad de turbulencia para flujos monofásicos a alto número de Reynolds. Para flujos burbujeantes, el nivel de agitación es de gran magnitud aún en los casos con números de Reynolds moderados. Las mediciones se llevaron a cabo en un canal vertical de 1 m de largo y con sección transversal de  $5 \times 10$  cm. Se usó un banco de 293 capilares de 0.15 mm de diámetro interior para generar burbujas pequeñas. la concentración de burbujas o fracción volumétrica se varió entre  $\alpha = 0.001$  y  $\alpha = 0.05$ . Se utilizó agua y diferentes mezclas de agua con glicerina para variar la viscosidad del líquido y así obtener mediciones para un amplio rango de número de Reynolds.

Las mediciones de velocidad de líquido se realizaron mediante la técnica de anemometría de película caliente. Es sabido que cuando la velocidad media de un flujo es comparable con la velocidad fluctuante, las mediciones con un sensor de película caliente estático no son confiables. Para evitar que la medición sea ambigua, se optó por la técnica de medición con el sensor en movimiento. En el experimento, el desplazamiento del sensor es de 25 cm aproximadamente y las velocidades de traslación varían entre 10 y 30 cm/s. La velocidad del fluido se calculó mediante la diferencia entre la velocidad medida en el anemómetro y la velocidad de traslación del sensor. Utilizando un sensor inclinado se obtuvieron mediciones de dos componentes de velocidad. También se obtuvieron fotografías de burbujas utilizando una cámara de alta velocidad. Con estas fotografías se realizaron mediciones de tamaño de burbujas y se analizó la interacción entre una burbuja y el sensor.

Se observó que para líquidos con baja viscosidad la velocidad de la fase continua fluctúa alrededor de cero. Para líquidos más viscosos se observan circulaciones de líquido en algunas zonas. En estos casos la velocidad media de líquido es diferente de cero. Se comprobó que la velocidad y agitación presente en la fase continua no dependen de la velocidad de traslación del sensor. En todos los casos se observó que la agitación del líquido aumenta con la fracción volumétrica. Los resultados obtenidos

para mediciones de dos componentes de velocidad muestran que la agitación del líquido en dirección vertical y horizontal son muy similares. Se encontró que en el caso de las soluciones de glicerina, la magnitud de la agitación es inversamente proporcional al número de Reynolds. Con agua sucede lo opuesto.

Finalmente, se realizaron comparaciones con mediciones similares reportadas en la literatura encontrando una buena concordancia. La medición experimental de la agitación en un flujo burbujeante utilizando la técnica de un sensor en movimiento no ha sido reportada anteriormente.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y objetivos . . . . .	1
1.2. Flujos Multifásicos . . . . .	2
1.2.1. Flujos gas-líquido . . . . .	5
1.3. Variables importantes . . . . .	7
1.4. Anemometría de película caliente . . . . .	9
1.4.1. Principio de operación . . . . .	9
1.4.2. Sensor de película caliente . . . . .	12
1.5. Estadística de señales . . . . .	13
1.6. Avances en la medición de flujos burbujeantes . . . . .	16
1.6.1. Anemometría de película caliente . . . . .	16
1.6.2. Medición de velocidades de líquido y gas en canales . . . . .	17
1.6.3. Agitación de líquido . . . . .	18
<b>2. Desarrollo Experimental</b>	<b>19</b>
2.1. Descripción general del dispositivo experimental . . . . .	19
2.2. Descripción del flujo . . . . .	19
2.3. Traslación del sensor . . . . .	22
2.4. Obtención de datos . . . . .	24
2.5. Calibración del sensor . . . . .	25
2.6. Medición de dos componentes de velocidad . . . . .	31
<b>3. Resultados</b>	<b>37</b>
3.1. Validación . . . . .	37
3.2. Características de las señales y burbujas . . . . .	46
3.2.1. Análisis del choque de una burbuja con el sensor . . . . .	55
3.3. Agitación de la fase continua . . . . .	55
<b>4. Conclusiones</b>	<b>63</b>



# Índice de figuras

1.1. Regímenes flujos gas-líquido: a) flujo burbujeante b) flujo tapón c) flujo anular d) flujo disperso e) flujo estratificado. . . . .	5
1.2. Diámetro equivalente. . . . .	8
1.3. Circuito modo temperatura constante. . . . .	10
1.4. Sensor de película caliente típico. . . . .	11
1.5. Diferentes configuraciones de película caliente: a) cilindro b) cono c) montado en superficie d) cuña. . . . .	12
1.6. Señal continua en el tiempo. . . . .	13
2.1. Dispositivo experimental. . . . .	20
2.2. (a) Fotografía de capilares generando burbujas (b) Flujómetro Gilmont. . . . .	21
2.3. Medición de niveles. . . . .	22
2.4. Mecanismo para movimiento del sensor. . . . .	23
2.5. Gráfica velocidad de traslación del sensor vs voltaje de fuente. . . . .	24
2.6. Sistema de medición digital. . . . .	25
2.7. Señales de voltaje típicas para tres velocidades de traslación del sensor. . . . .	26
2.8. Datos de calibración del sensor de película caliente y su curva de ajuste. . . . .	26
2.9. Señal de voltaje de flujo agua-burbujas, $\alpha = 0.0084$ y velocidad de sensor 17.85 cm/s. . . . .	27
2.10. Señal de velocidad correspondiente a la señal de voltaje de la figura 2.9. . . . .	28
2.11. Señal de velocidad mostrando el intervalo de movimiento del sensor, habiendo restado su velocidad de traslación. . . . .	28
2.12. Señal de velocidad mostrando en detalle tres contactos de burbujas con el sensor. . . . .	29
2.13. Primera derivada de la señal de velocidad. . . . .	30
2.14. Señal mostrando la velocidad fluctuante de la fase líquida eliminando los choques de burbujas. . . . .	30

2.15. Sistema coordinado para un sensor de película caliente y sus velocidades correspondientes. (a) sistema general (b) sistema para un flujo bidimensional. . . . .	32
2.16. Sistema coordinado de un sensor con alambre inclinado para mediciones de dos componentes de velocidad. . . . .	33
3.1. Espectro de frecuencias para las señales de velocidad (agua): líquido sin burbujas, $\alpha = 0.0084$ , $\alpha = 0.0267$ . Velocidad de traslación 17.8 cm/s. . . . .	38
3.2. Velocidad media de líquido a diferentes velocidades de traslación. Agua: (a) $\alpha = 0.0078$ , (b) $\alpha = 0.0272$ y (c) $\alpha = 0.0472$ . Agua-glicerina 30 %: (d) $\alpha = 0.0075$ , (e) $\alpha = 0.0138$ y (f) $\alpha = 0.0344$ . . . . .	39
3.3. Variancia a diferentes velocidades de traslación: agua (a) $\alpha = 0.0078$ , (b) $\alpha = 0.0272$ ; agua-glicerina 15 % (c) $\alpha = 0.00547$ , (d) $\alpha = 0.0308$ . . . . .	41
3.4. Variancia a diferentes velocidades de traslación (continuación): agua-glicerina 30 % (e) $\alpha = 0.0075$ (f) $\alpha = 0.0344$ ; agua-glicerina 50 % (g) $\alpha = 0.011$ (h) $\alpha = 0.0247$ . . . . .	42
3.5. Señales de velocidad de agua con $\alpha = 0.0084$ : (a) sensor en posición estática, (b) sensor en movimiento $U_s = 17.85$ cm/s. . . . .	44
3.6. Diferencias entre mediciones con el sensor estático y el sensor en movimiento para agua: (a) velocidad media líquido, (b) variancia. . . . .	45
3.7. Fotos de burbujas: agua (a) $\alpha = 0.0026$ (b) $\alpha = 0.027$ (c) $\alpha = 0.047$ , agua-glicerina 15 % (d) $\alpha = 0.0032$ (e) $\alpha = 0.026$ (f) $\alpha = 0.050$ , agua-glicerina 30 % (g) $\alpha = 0.0012$ (h) $\alpha = 0.025$ (i) $\alpha = 0.050$ y agua-glicerina 50 % (j) $\alpha = 0.0032$ (k) $\alpha = 0.010$ (l) $\alpha = 0.021$ . . . . .	47
3.8. Diámetro equivalente a diferentes fracciones volumétricas. . . . .	48
3.9. Velocidad media de burbujas $U_B$ a diferentes fracciones volumétricas. Tomado de Martínez (2003). . . . .	49
3.10. Señales de velocidad líquido: agua (a) $\alpha = 0.0026$ (b) $\alpha = 0.027$ (c) $\alpha = 0.047$ , agua-glicerina 15 % (d) $\alpha = 0.0032$ (e) $\alpha = 0.026$ (f) $\alpha = 0.050$ . . . . .	50
3.11. Señales de velocidad líquido (continuación): agua-glicerina 30 % (g) $\alpha = 0.0012$ (h) $\alpha = 0.025$ (i) $\alpha = 0.050$ y agua-glicerina 50 % (j) $\alpha = 0.0032$ (k) $\alpha = 0.010$ (l) $\alpha = 0.021$ . . . . .	51
3.12. Velocidad media de líquido $\bar{U}$ (dirección vertical) a diferentes fracciones volumétricas. . . . .	53
3.13. Contacto de una burbuja con el sensor. . . . .	54
3.14. Variancia en función de la fracción volumétrica (a) agua (b) agua-glicerina 15 %. . . . .	56

3.15. (Continuación) Variancia en función de la fracción volumétrica (c) agua-glicerina 30 % (b) agua-glicerina 50 % . . . . .	57
3.16. Variancia de la velocidad vertical en función de la fracción volumétrica para los diferentes líquidos. . . . .	58
3.17. Variancia normalizada en función de la fracción volumétrica para los diferentes líquidos. . . . .	60
3.18. Variancia normalizada en función del número de Reynolds para los diferentes líquidos. . . . .	61
3.19. Variancia normalizada en función de $\alpha/Re$ ; resultados obtenidos previamente para varios flujos bifásicos. Tomado de Cartellier y Rivière (2001). . . . .	62



# Índice de cuadros

1.1. Ejemplos de flujos multicomponentes y multifásicos (Crowe 1998). . . . .	3
1.2. Tipos y configuraciones en flujos bifásicos. . . . .	4
2.1. Propiedades físicas de los líquidos utilizados. . . . .	21
2.2. Características del flujómetro. . . . .	22



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación y objetivos

El estudio de los flujos multifásicos es importante en una variedad de aplicaciones en la industria. En particular, los flujos gas-líquido se encuentran comúnmente en reactores químicos, dispositivos de refrigeración, intercambiadores de calor, etc.

La medición de las velocidades locales de gas y líquido en un sistema de dos fases es de gran interés en investigación ya que ayuda a predecir el comportamiento de estos flujos. La obtención de mediciones exactas de velocidad es importante en investigación para redefinir o validar modelos de flujo. La velocidad relativa entre la fase líquida y gaseosa es un parámetro esencial en la determinación de la caída de presión y el cálculo de la fracción volumétrica local. Sin embargo, la medición directa de la velocidad de ambas fases es difícil debido a la naturaleza transitoria y fluctuante del sistema. En particular, la medición de la velocidad del líquido es importante para obtener información de su estructura turbulenta, la cual es esencial para entender la interacción entre ambas fases.

Las técnicas de medición más comunes para la obtención de la velocidad del líquido o gas en flujos burbujeantes son la *velocimetría por láser Doppler* (LDV) y la *anemometría de película caliente*. La primera es una técnica óptica no intrusiva que requiere el uso de canales y fluidos transparentes; la segunda técnica no requiere esto último pero introduce un elemento sensor dentro del flujo. Para la obtención de mediciones de velocidad, ambas técnicas necesitan la existencia de un flujo pasando a través de la zona de medición. La velocimetría por láser Doppler presenta problemas cuando la zona de medición tiene una alta concentración de burbujas ya que el flujo pierde transparencia. La ventaja de la técnica de anemometría de película caliente es la posibilidad de medir la velocidad fluctuante de la fase continua. En la mayoría de los trabajos experimentales reportados para flujos burbujeantes, se induce una velo-

cidad media constante a la fase líquida y el sensor o la zona de medición se mantienen en una posición fija. En estos casos la agitación característica de la fase continua no depende exclusivamente de la interacción gas-líquido sino también del movimiento propio del líquido. Sin embargo existen ejemplos industriales de flujos burbujeantes donde la fase continua no tiene circulación y solo las burbujas presentan movimiento. En estos casos la agitación presente en el líquido dependerá principalmente de la interacción de las burbujas con el líquido.

Una de las principales restricciones del anemómetro de película caliente estacionario es la dificultad de medir e interpretar correctamente flujos con *corriente inversa*. Como la sonda de película caliente responde a la velocidad relativa entre el flujo y el sensor, este problema puede solucionarse desplazando la punta sensible a una velocidad determinada. La velocidad impuesta al sensor debe ser mayor que la componente fluctuante de la velocidad del flujo.

En la presente tesis se tiene como primer objetivo medir y estudiar la velocidad fluctuante del líquido en un flujo gas-líquido en régimen burbujeante. En general nuestro interés está en el entendimiento de las fluctuaciones tipo turbulentas que aparecen en flujos burbujeantes a bajo número de Reynolds. Se propone una técnica que permite hacer mediciones de velocidad sin la necesidad de inducir movimiento al líquido. En otras palabras, cuando no se generan burbujas, la velocidad media del líquido es cero. La técnica consiste en desplazar la punta de prueba, inmersa en el flujo, a una velocidad constante dada. De esta manera se impone de manera artificial una componente media a la señal medida. Esta componente puede sustraerse durante el procesamiento de la señal y así puede obtenerse una medición verdadera de la velocidad fluctuante. De las mediciones obtenidas se requiere comprobar si la técnica propuesta genera resultados comparables con resultados previamente obtenidos.

Como segundo objetivo, se desea analizar el grado de agitación de la fase líquida presente en el flujo para diferentes concentraciones de gas. Además se desea estudiar la agitación haciendo mediciones con líquidos de diferente viscosidad. Se estudia la manera en que la velocidad de traslación del sensor afecta el cálculo de la agitación del líquido y además se hace un estudio de la interacción entre el elemento sensor y una burbuja.

## 1.2. Flujos Multifásicos

En el estudio de los materiales multifásicos, la usual clasificación de los materiales en líquidos, sólidos y gaseosos, no es del todo satisfactoria. Existen materiales como la mayonesa, el lodo, las pinturas o la pasta de dientes que no se comportan totalmente como sólidos o líquidos o que presentan propiedades de ambos estados. Una *fase* es uno de los estados de la materia, es decir, sólido, líquido o gaseoso. Un

	un componente	multicomponente
una fase	flujo de agua flujo de nitrógeno	flujo de aire flujo de emulsiones
multifásico	flujo agua-vapor flujos granulares	flujo aire-agua lecho fluidizado

Cuadro 1.1: Ejemplos de flujos multicomponentes y multifásicos (Crowe 1998).

**flujo multifásico** es el flujo simultáneo de varias fases. Una *componente* es una especie química como el nitrógeno, oxígeno o agua. El flujo de aire, que está compuesto por una mezcla de gases (nitrógeno, oxígeno, etc.), es un ejemplo de un *flujo multicomponente* pero de una sola fase. En el cuadro 1.1 se muestran ejemplos de flujos multifásicos y multicomponentes.

Los flujos multifásicos pueden presentarse en una amplia gama de fenómenos naturales y procesos industriales. La mayoría de las operaciones en ingeniería química tales como evaporación, condensación, separación y mezclado están relacionadas con flujos multifásicos. Su estudio es importante en los análisis de control de seguridad de los reactores nucleares. Entre muchas aplicaciones se pueden mencionar: control de contaminantes (remoción de partículas sólidas de afluentes industriales), secado de materiales farmacéuticos, transporte neumático, lechos fluidizados, manufactura y proceso de materiales (formado con atomizado de metales), soldadura con plasma, corte de materiales a través de chorros agua-abrasivo, sistemas de propulsión con flujos gas-líquido (cohetes), control de fuego (gotas de agua y gases calientes), hornos industriales (mezcla aire y carbón pulverizado), etc.

Una clase de flujos multifásicos son los flujos bifásicos y dentro de ellos se puede encontrar cuatro tipos de flujos:

- líquido-gas
- líquido-líquido
- sólido-gas
- sólido-líquido

Así mismo estos flujos pueden tener diferentes morfologías. El cuadro 1.2 muestra las configuraciones posibles y algunos ejemplos representativos.

<i>Combinación de fases</i>	<i>Configuración de las fases</i>	<i>Procesos, fenómenos naturales</i>
gas-sólido	Dispersión de partículas sólidas en gas	Aerosoles  Chorros de explosiones volcánicas Lechos fluidizados con gas Flujo de materiales granulares Transporte neumático de partículas Formación de dunas Aparatos de filtrado y de recolección de partículas
líquido-sólido	Dispersión de partículas sólidas en líquidos	Hidrosoles  Formación de patrones por microorganismos que nadan Transporte hidráulico de partículas Corrientes turbias Lechos fluidizados líquidas
	Sólido poroso lleno con líquido	Flujo de petróleo en el subsuelo
líquido-gas	Dispersión de gotas en gas	Niebla, nubes, neblina  Coalescencia de gotas y formación de lluvia Flujo a alta velocidad de vapor con condensación
	Dispersión de burbujas de gas en líquido	Flujo de aceite  Flujo de líquidos hirvientes en tuberías
	Gas y líquidos conectados	Régimen anular en un flujo vertical  Movimiento de la interfaz líquido-agua en suelos
líquido-líquido	Dispersión de gotas en líquidos	Cremas y emulsiones  Coalescencia de 2 gotas y separación de fases
	Ambos líquidos conectados	Transporte de dos líquidos en una tubería horizontal Movimiento de agua y aceite en pozos de extracción

Cuadro 1.2: Tipos y configuraciones en flujos bifásicos.

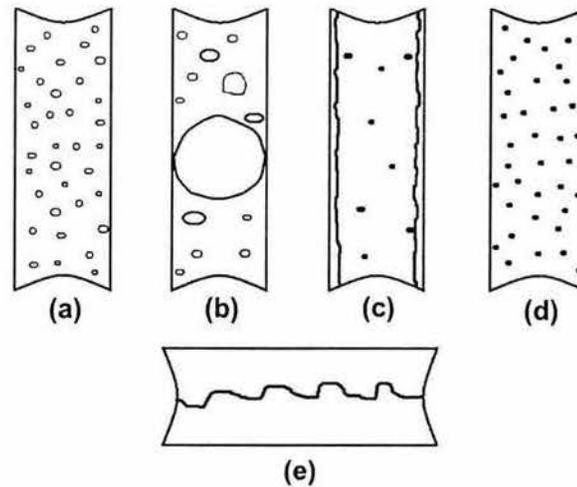


Figura 1.1: Regímenes flujos gas-líquido: a) flujo burbujeante b) flujo tapón c) flujo anular d) flujo disperso e) flujo estratificado.

### 1.2.1. Flujos gas-líquido

El estudio de los flujos gas-líquido es de gran importancia para la industria debido a que se presentan en algunos procesos como lo son cavitación, producción de vapor, extracción de petróleo, flujo en reactores, etc. Se ha tomado una considerable atención en el análisis del ascenso de las burbujas a través del líquido ya sea individualmente o en grupo. Cuando un flujo gas-líquido fluye en un canal, pueden presentarse diferentes configuraciones o patrones de flujo. Cada patrón se caracteriza por una distribución similar de las dos fases y la interface. La transición entre un régimen y otro ocurre cuando existen cambios en la geometría en la interface gas-líquido. La ocurrencia de este tipo de flujos y su transición a otros regímenes de flujo han sido reportados por Jones y Zuber (1975). La figura 1.1 muestra los patrones de flujo característicos en un canal. Los regímenes más representativos son:

- *flujo burbujeante*. El líquido es la fase continua y el gas es la fase dispersa en el líquido en forma de burbujas de tamaño y forma variables.
- *flujo tapón (slug)*. Se caracteriza por la presencia de burbujas de gran tamaño que ocupan casi toda la sección transversal del canal.

- *flujo anular*. Este flujo presenta una película de líquido en las paredes del canal. En la parte central fluye el gas y puede haber pequeñas gotas de líquido.
- *flujo disperso o neblina*. El gas ocupa la mayor parte de la sección transversal del canal y el líquido se encuentra en forma de pequeñas gotas dispersas en el líquido.
- *flujo estratificado*. Cuando el canal está en una posición horizontal o inclinado el líquido fluye en la parte inferior del canal y el gas en la parte superior del mismo debido a la presencia de fuerzas gravitacionales .

El estudio particular de los **flujos burbujeantes** es de interés en la presente tesis. Muchos flujos burbujeantes no son flujos completamente desarrollados ya que, dado cierto tiempo o distancia, las burbujas chocan entre sí y su aglomeración puede conllevar a la formación de burbujas más grandes y de flujo *tapón*. En ciertos casos, cuando se tiene cuidado en su formación, las burbujas presentes en una corriente son lo suficientemente pequeñas y rara vez se tocan; el flujo burbujeante puede persistir así por una distancia considerable. Existen métodos para disminuir la coalescencia de las burbujas y lograr que el flujo sea prácticamente monodisperso a lo largo de un canal (Lessard 1971).

El ascenso de una sola burbuja a través del líquido ha sido estudiado extensamente (Clift *et al* 1978; Duiniveld 1995; Alcaraz 2004) y se ha encontrado que cuando las burbujas son muy pequeñas, las fuerzas de tensión superficial la mantienen esférica y tiende a preservar esa configuración a lo largo de su trayectoria. En la mayoría de los casos prácticos la burbuja no se mantiene esférica, la interface gas-líquido puede variar debido a varios factores y la burbuja puede tomar diferentes formas parecidas a elipsoides, sección semiesférica (*cap*), amorfas, etc. La forma de la trayectoria ha sido también estudiada y se ha encontrado que las burbujas de forma esférica tienden a ascender en forma rectilínea mientras que las burbujas elipsoidales lo hacen en una trayectoria de zig-zag o helicoidal (Ellingsen y Risso 2001). Clift *et al.* (1978) proponen una gráfica generalizada en términos del número de Eötvös, el número de Reynolds y el número de Morton (ver sección 1.3), en la cual pueden catalogarse varias formas de burbujas. El movimiento de la burbuja no sólo depende del tamaño y forma de la misma sino que también hay que considerar factores como la inercia del gas y del líquido, viscosidad de ambas fases, diferencias de densidades, flotación, tensión superficial y contaminación del fluido, así como la transferencia de masa y de calor. También se han reportado variaciones en la forma de la burbuja en flujos burbujeantes, sólo que el análisis es más complicado porque en estos casos también debe considerarse la interacción, colisión y coalescencia entre las burbujas.

### 1.3. Variables importantes

En flujos bifásicos es importante reconocer las propiedades de las distintas fases o componentes. Sea el líquido la fase 1 y el gas la fase 2. El flujo másico total es representado por el símbolo  $W$ . El flujo total es la suma de los flujos de las fases

$$W = W_1 + W_2. \quad (1.1)$$

De la misma manera el flujo volumétrico total  $Q$  se define

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (1.2)$$

por tanto:

$$Q_1 = \frac{W_1}{\rho_1}$$

$$Q_2 = \frac{W_2}{\rho_2}$$

donde  $\rho_i$  y  $W_i$  son la densidad y el flujo másico de la fase  $i$  respectivamente. Sea  $\alpha$  la fracción volumétrica promedio de la fase dispersa en el flujo bifásico. En flujo gas-líquido  $\alpha$  representa la fracción volumétrica o la concentración volumétrica del gas presente en la mezcla. Usualmente  $\alpha$  es medida como un promedio sobre toda la sección transversal y en una longitud adecuada de la tubería para eliminar posibles fluctuaciones locales. Entonces, para una tubería de longitud  $L$  y área de sección transversal  $A$ , el valor promedio de  $\alpha$  es entonces:

$$\bar{\alpha} = \frac{V_2}{AL} \quad (1.3)$$

donde  $V_2$  es el volumen total del componente 2 en esa región. Cuando el flujo no es uniforme no es posible medir  $\alpha$  sobre una longitud considerable de la tubería. En estos casos un gran número de lecturas instantáneas sobre una longitud  $\partial L$  dan el promedio temporal de  $\alpha$  en una localidad determinada. El valor promedio de  $\alpha$  tanto espacial como temporal es:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\iint \alpha(r, t) dr dt}{\int dr \int dt}. \quad (1.4)$$

Algunos números adimensionales importantes en flujos gas-líquido son

Número de Morton

$$M = \frac{g \mu_f^4 \Delta \rho}{\rho_f^2 \sigma^3} \quad (1.5)$$

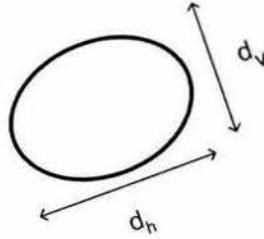


Figura 1.2: Diámetro equivalente.

Número de Eötvös

$$Eo = \frac{g\Delta\rho d_b^2}{\sigma} \quad (1.6)$$

Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho_f U_b d_b}{\mu_f} \quad (1.7)$$

Número de Weber

$$We = \frac{\rho_f U_b^2 d_b}{\sigma} \quad (1.8)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\mu_f$  y  $\rho_f$  la viscosidad y densidad del fluido,  $d_b$  y  $U_b$  el diámetro y velocidad de ascenso de la burbuja,  $\sigma$  es la tensión superficial entre el líquido y el gas y  $\Delta\rho$  es la diferencia de densidades entre las dos fases. En la mayoría de los casos la burbuja no es esférica; ésta puede tomar formas elipsoidales o incluso amorfas, por tanto el diámetro de burbuja que se utiliza en las relaciones anteriores es el *diámetro equivalente*. En general, una burbuja puede tomar una forma como la que se muestra en la figura 1.2. El diámetro equivalente se obtiene del volumen del elipsoide equivalente al de una esfera del mismo volumen. Se tiene

$$d_{eq} = \sqrt[3]{d_h^2 d_v}. \quad (1.9)$$

El factor de forma se define como:

$$\chi = \frac{d_{hor}}{d_{ver}}. \quad (1.10)$$

## 1.4. Anemometría de película caliente

La técnica usada para la medición de la velocidad fluctuante de la fase continua en esta tesis fue la anemometría de película caliente (*hot-film anemometry*) y por tanto es conveniente mencionar algunas características de la operación de la misma. La explicación del funcionamiento del anémometro de película caliente está basada principalmente en Brunn (1995). La técnica es mejor conocida como anemometría de hilo caliente o HWA (*hot-wire anemometry*), la cual está basada en la transferencia de calor entre un elemento sensor (alambre o película) y un fluido en movimiento. Cualquier cambio en la condición del flujo que afecte la transferencia de calor entre estos elementos será detectado instantáneamente por un sistema HWA. El anemómetro puede ser utilizado para obtener información acerca de la velocidad o temperatura del flujo, cambios de fase en flujos multifásicos, y como consecuencia, datos de vorticidad, cambios de concentración en mezclas de gases, entre otros.

### 1.4.1. Principio de operación

La anemometría de película caliente está basada en la transferencia de calor (principalmente por convección) de un sensor que es calentado por una corriente eléctrica. La respuesta del sensor consiste en una señal analógica de voltaje. Las configuraciones de sensor más comunes son alambres cilíndricos y películas depositadas sobre fibras cilíndricas. Para obtener resultados, una sonda de película caliente debe ser calibrada. Esto es, el alambre debe ser expuesto a velocidades de flujo conocidas y su respuesta (voltaje de salida) debe ser registrada sobre un rango de velocidades. Algunos medios para conocer la velocidad del flujo son los tubos de Pitot, piezómetros, manómetros, etc.

La transferencia de calor de una película caliente sumergida en un flujo depende tanto de las propiedades del fluido (densidad, viscosidad, conductividad térmica, calor específico, etc.) como de los parámetros del flujo (vector velocidad, temperatura del fluido, presión, etc). Los anemómetros pueden operar en el modo temperatura constante (circuito CT) o corriente constante (circuito CC). En el primer modo la corriente que pasa a través del alambre se ajusta para mantener la temperatura del hilo (medida a través de su resistencia eléctrica) constante. En el modo corriente constante la temperatura del sensor es lo que varía.

Para medición de velocidad existen mayores ventajas al mantener el hilo o la película a una temperatura constante ya que la inercia térmica del sensor es ajustada automáticamente cuando las condiciones de flujo varían. La corriente requerida para mantener la resistencia del sensor constante se convierte en una respuesta electrónica al cambio de la velocidad del flujo.

El principio del circuito CT es ilustrado en la figura 1.3. La sonda es colocada en

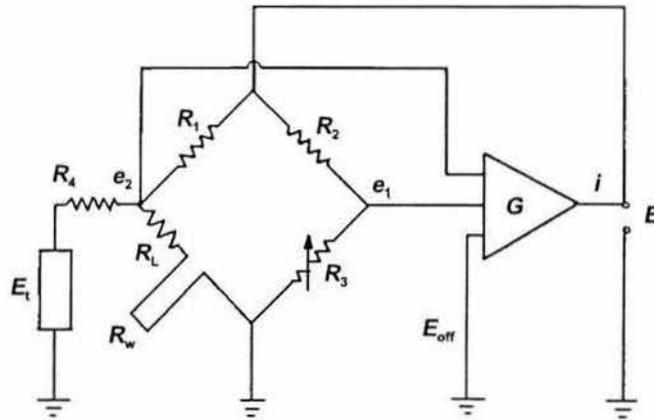


Figura 1.3: Circuito modo temperatura constante.

un puente electrónico Wheatstone.  $R_1, R_2, R_3, R_4$  son resistencias del puente,  $R_L$  es la resistencia del cable que conecta el sensor con el anemómetro,  $R_w$  es la resistencia del hilo cuando pasa una corriente  $i$ . Este modo de operación incorpora al circuito CT un amplificador diferencial de retroalimentación con el fin de obtener una variación rápida en la corriente eléctrica de calentamiento para compensar los cambios instantáneos de la velocidad. Algunos circuitos cuentan con un voltaje compensación  $E_{off}$  y una señal de perturbación electrónica  $E_t$  para pruebas de respuesta de frecuencia del sensor.

Cuando el sensor es colocado en un flujo, el alambre se enfría o calienta, variando así su temperatura y por tanto su resistencia eléctrica  $R_w$ . Para mantener la temperatura del sensor constante, se requiere modificar la corriente  $i$  que pasa a través de él. Mientras las condiciones de flujo varían, el puente se desbalancea obteniéndose un voltaje de error  $e_2 - e_1$  que es una medida proporcional del cambio correspondiente de la resistencia del alambre. Esta diferencia de voltajes conforman la entrada al amplificador operacional  $G$ . La diferencia entre estos dos voltajes también es conocida como voltaje de puente o  $E_B$ . El amplificador genera una corriente de salida la cual es inversamente proporcional al cambio de la resistencia del sensor. Al retroalimentar esta corriente en la parte superior del puente se reinicia la resistencia del sensor a su valor original, y con esto el valor de la temperatura del hilo permanece constante. A cada cambio del valor de la resistencia del sensor, se obtiene un voltaje de salida  $E$ . De esta manera los cambios en la velocidad del flujo generan una señal

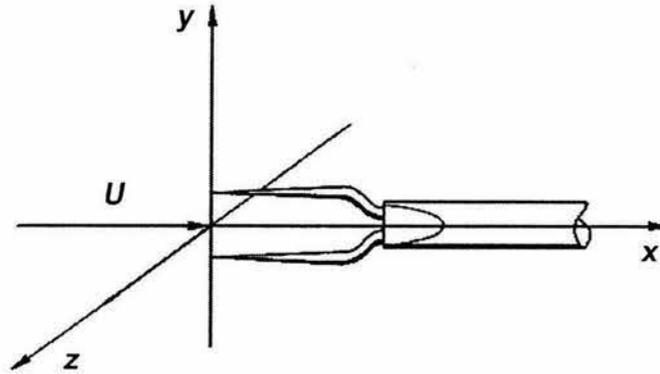


Figura 1.4: Sensor de película caliente típico.

en el tiempo  $E(t)$ .

Para un sensor de hilo caliente con puente electrónico balanceado se cumple la siguiente ecuación (Brunn 1995).

$$\frac{E^2 R_w}{(R_1 + R_L + R_w)^2} = (C_1 + C_2 U^n)(T_w - T_a)$$

donde  $U$  es la velocidad del flujo,  $T_w$  es la temperatura del hilo cuando está calentado por la corriente  $i$ ,  $T_a$  es la temperatura del hilo a temperatura ambiente,  $C_1, C_2$  y  $n$  son constantes que pueden ser determinadas con procedimientos de calibración. En el modo temperatura constante la resistencia del hilo o película  $R_w$  permanece constante independientemente de las condiciones de flujo. También se asume que  $C_1, C_2$  y  $n$  tienen valores constantes independientes de la velocidad del flujo. Por tanto la ecuación puede reducirse

$$E^2 = A + BU^n. \quad (1.11)$$

Las constantes  $A$  y  $B$  se determinan en la calibración del sensor. La constante  $n$  depende del tipo de sonda que se utilice y del medio en que se esté midiendo. Con la ecuación 1.11 se pueden convertir los datos de voltaje en velocidad.

En la figura 1.4 se muestra el diagrama de un sensor de película caliente típico. La sonda consiste de un elemento cilíndrico sensible, el cual está sujeto en sus extremos por dos soportes. Este tipo de sensor es el más sencillo y se le conoce como SN (*single normal*). Con esta sonda se puede medir una componente de velocidad. En este caso, los soportes están colocados en un plano paralelo al flujo principal con velocidad  $U$  (dirección  $x$ ). Existen diferentes configuraciones de sensores dependiendo de la región

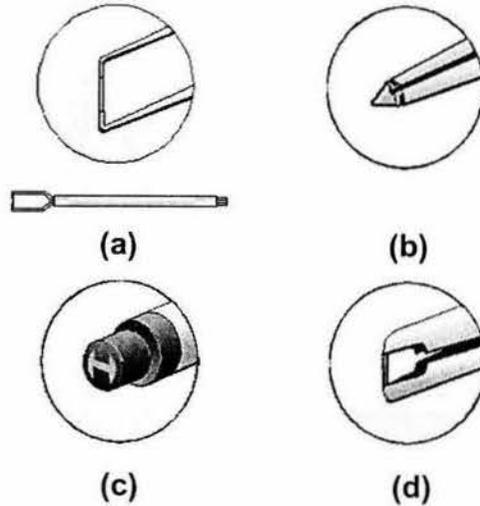


Figura 1.5: Diferentes configuraciones de película caliente: a) cilindro b) cono c) montado en superficie d) cuña.

que se quiera medir en un experimento y el número de componentes de velocidad que se desee conocer.

#### 1.4.2. Sensor de película caliente

Esta clase de sensor consiste en una película de níquel o platino muy fina ( $\sim 0,1 \mu\text{m}$ ), la cual se coloca por un proceso de depósito sobre un substrato (comúnmente cuarzo). Dicho substrato es un aislante térmico y puede tener formas diferentes, las más comunes son: cilindros, cuñas y conos como se muestra en la figura 1.5. Para ciertas mediciones específicas existen sondas que pueden adherirse a una superficie (*flush mounted*). Una capa delgada de algún material conductor es conectada en los extremos de la película para suministrar la corriente eléctrica. Comúnmente la película se cubre con una capa de cuarzo o cualquier otro material aislante de  $1 - 2 \mu\text{m}$ . Esta cubierta protege a la película de partículas abrasivas y provee aislamiento eléctrico para mediciones en líquidos. Para películas cilíndricas, como la utilizada en la presente tesis, el elemento activo mide aproximadamente  $25 - 70 \mu\text{m}$  de diámetro y  $1-2 \text{ mm}$  de largo. Las películas calientes son utilizadas principalmente para mediciones con líquidos, pero también son ampliamente utilizadas para mediciones de flujos gas-líquido.

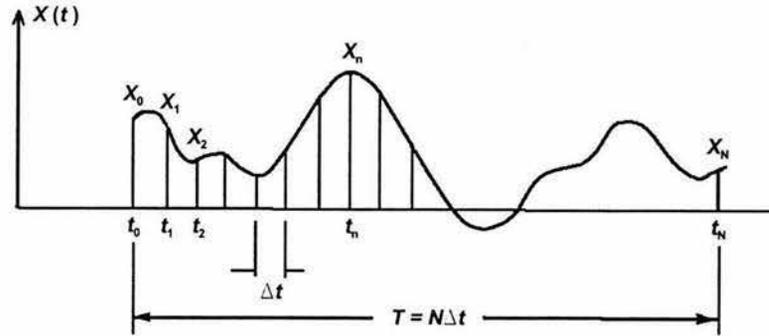


Figura 1.6: Señal continua en el tiempo.

## 1.5. Estadística de señales

La salida de un anemómetro de película caliente es en general una señal de voltaje que puede convertirse en una señal, variante en el tiempo, de una componente de velocidad de un flujo. Otra cantidad puede ser la temperatura. Una señal continua  $X(t)$  puede expresarse en términos de un valor promedio y una componente fluctuante, esto es:

$$X(t) = \bar{X} + x(t). \quad (1.12)$$

Una señal típica se muestra en la figura 1.6. Cuando se analiza una señal digital, la señal analógica  $X(t)$ ,  $0 \leq t \leq T$  es reemplazada por una señal discreta  $X(n)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ . El tiempo total de la señal es  $T$  y  $N$  es el número total de datos.  $N$  y  $T$  están relacionados con la frecuencia de muestreo  $SR$ , esto es

$$N = SR \times T$$

y el intervalo de tiempo  $\Delta t$  entre cada dato está dado por

$$\Delta t = 1/SR = T/N.$$

El valor promedio de una señal digital finita está dado por:

$$\hat{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X(n) \quad (1.13)$$

donde  $\hat{X}$  es una estimación no sesgada del valor medio real  $\bar{X}$ .

En la presente tesis se estudia el grado de agitación de la fase líquida en la columna burbujeante para diferentes condiciones de flujo. Como medida de esta agitación se calcula la variancia de la velocidad del líquido a partir de las mediciones obtenidas. La variancia de la señal discreta  $X(n)$  se define como

$$\text{var}[X(n)] = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (X(n) - \hat{X})^2. \quad (1.14)$$

Se puede obtener una predicción de la variancia de la velocidad de líquido para el caso de suspensiones diluidas de burbujas distribuidas de manera homogénea. Esto se realiza mediante el cálculo, para flujo potencial, de la variancia de velocidad de fluido producido por una sola burbuja esférica moviéndose a través de un fluido con fronteras infinitas (Zenit 2001). La función potencial de una esfera de radio,  $a = d_b/2$ , moviéndose a una velocidad  $u_b$  está dada por:

$$\phi = \frac{1}{2} \frac{a^3}{r^3} x \cdot u_b. \quad (1.15)$$

Las velocidades del fluido para las direcciones vertical y horizontal son calculadas por:

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$u_y = \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

donde el eje  $x$  es paralelo a la gravedad. Para obtener la variancia de velocidad del fluido, el cuadrado de la agitación de la velocidad es integrado sobre todo el espacio y multiplicado por el número de densidad de burbujas  $n$ , es decir, el número de burbujas entre el volumen de líquido,

$$\langle u_x^2 \rangle = n \int_V u_x^2 dV$$

$$\langle u_y^2 \rangle = n \int_V u_y^2 dV$$

resultando

$$\langle u_x^2 \rangle = \frac{1}{5} \alpha u_b^2 \quad (1.16)$$

$$\langle u_y^2 \rangle = \frac{3}{20} \alpha u_b^2. \quad (1.17)$$

Otra cantidad de importancia en el análisis de señales es la función densidad espectral de potencia  $G_x(\omega)$ . Esta función es una medida de la energía que contiene una señal en cada banda de frecuencia y puede expresarse matemáticamente en términos de una transformada de Fourier. Para una función continua la transformada de Fourier se define

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2\pi i\omega t} dt. \quad (1.18)$$

La función densidad espectral también puede ser definida y evaluada desde una transformada de Fourier finita. Considerando un registro en el tiempo  $x_k(t)$ , para un intervalo de tiempo finito  $0 \leq t \leq T$  se define

$$X_k(\omega, T) = \int_0^T x_k(t)e^{-2\pi i\omega t} dt. \quad (1.19)$$

La función densidad espectral de potencia se define

$$G_x(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[X_k(\omega, T)X_k^*(\omega, T)] \quad (1.20)$$

$$\tilde{G}_x(\omega) = \frac{1}{T} |X_k(\omega, T)|^2 \quad (1.21)$$

donde  $X_k^*(\omega, T)$  es el conjugado complejo de la transformada de Fourier finita  $X_k(\omega, T)$ . La cantidad  $\tilde{G}_x(\omega)$  es una estimación de la función densidad espectral de potencia igual al cuadrado del módulo de la transformada de Fourier finita.

La versión digital de la transformada de Fourier finita se le llama transformada de Fourier discreta (DFT). Considérese un registro en el tiempo digital  $x(n\Delta t)$  ( $n = 0, 1, \dots, N-1$ ), donde  $N$  es el número total de datos y  $\Delta t = T/N$ . La transformada de Fourier producirá valores a frecuencias discretas

$$k\Delta f = \frac{k}{T} = \frac{k}{N\Delta t} \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

donde la frecuencia mínima es  $f_{min} = \Delta f = 1/T$ . La transformada de Fourier se expresa en versión digital

$$X(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t)\exp(-2\pi i kn/N) \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (1.22)$$

Los valores de  $k$  arriba de la frecuencia  $N/2$  pueden ser interpretados como valores de frecuencia negativos. La correspondiente estimación de la función densidad espectral de potencia discreta es

$$\tilde{G}_x(k\Delta f) = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{n=0}^{N-1} |X(k\Delta f)|^2 \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1. \quad (1.23)$$

## 1.6. Avances en la medición de flujos burbujeantes

### 1.6.1. Anemometría de película caliente

Existen muchos trabajos previos en donde se han realizado mediciones de velocidad utilizando un sensor de alambre o película caliente en movimiento. Esta técnica es mejor conocida como *flying hot wire anemometer technique*. Payne y Lumley (1966) realizaron los primeros experimentos con esta técnica usando un sensor tipo SN (*single normal*) fijado en un aeroplano. Obtuvieron mediciones a pequeña escala de la estructura de la turbulencia atmosférica. También se han reportado experimentos con la sonda fijada en un brazo con movimiento rotacional; este procedimiento ha facilitado la investigación en turbomaquinaria, tales como el realizado por Hah y Lakshminarayana (1978). Perry (1982) describe una técnica para medir velocidades de fluido en la estela formada por un flujo a través de un cuerpo estático. Realizando medidas en diferentes posiciones, Perry encontró el campo de velocidades y vorticidades en la estela. Más recientemente Cole y Glauser (1998) realizaron mediciones en un canal con una expansión súbita axisimétrica. En esta última investigación se dispone en el experimento de un arreglo de malla de varios sensores. Cole y Glauser diseñaron un aparato para medir flujos con recirculación al inicio de la expansión.

Los sensores de película caliente se han utilizado ampliamente en el estudio de flujos gas-líquido. Muchas investigaciones han sido enfocadas a la medición de la fracción volumétrica local del flujo. Con un sensor tipo *doble* (dos sensores cilíndricos separados una distancia fija) se han medido velocidades promedio de burbujas. A diferencia de las técnicas de medición ópticas y resistivas, la técnica de anemometría de película caliente tiene la ventaja de ser capaz de medir las fluctuaciones de velocidad de la fase continua y puede proveer información acerca de la estructura turbulenta del flujo bifásico. Las mediciones con sensor de película caliente se han realizado con sondas cilíndricas y cónicas principalmente. Así mismo se han reportado estudios de la respuesta del sensor a la presencia de una burbuja de gas. Farrar y Brunn (1989) presentan una descripción de la interacción entre un sensor de película caliente de forma cilíndrica y la interface de una burbuja, sus resultados son usados para interpretar los efectos de transferencia de calor de un sensor al contacto con una burbuja.

### 1.6.2. Medición de velocidades de líquido y gas en canales

En la literatura se reportan muchas investigaciones de medición de la velocidad para sistemas líquido-gas. A continuación se mencionan las más representativas. Wang y Ching (2001) utilizan dos sondas de película caliente fijadas en la parte lateral de un canal. Las sondas están separadas verticalmente por una distancia determinada. Por métodos de correlación cruzada este sistema puede medir la velocidad promedio local de las burbujas. Sun *et al.* (2002) utilizan una sonda de película caliente de forma cónica para medir velocidad de líquido. Para eliminar la presencia de las burbujas en la señal de velocidad, ellos utilizan criterios de nivel de *salto* (slope threshold method), que consiste en calcular la primera derivada de la señal de velocidad. Esta técnica es utilizada en la presente tesis y se explica en la sección 2.5. Farrar *et al.* proponen una técnica de detección basada no solamente en el cálculo óptimo de nivel de salto sino también en la amplitud de la señal.

Vasallo y Kumar (1999) realizaron mediciones simultáneas de velocidad media de líquido y burbujas, en régimen burbujeante y flujo tapón, en un canal vertical y rectangular. Existe circulación de líquido corriente arriba, flujo constante, y las mediciones fueron realizadas con la técnica LDV. Los experimentos se realizaron produciendo dos tamaños de burbujas diferentes. Obtuvieron perfiles de velocidad y encontraron que la velocidad promedio del líquido se incrementa ligeramente en presencia de las burbujas. Para el caso de burbujas grandes se encontró que el perfil de velocidad es simétrico y plano con una disminución de velocidad muy cerca de las paredes; las burbujas pequeñas (<1 mm) tienden a subir en una dirección preferencial, por tanto, el perfil de velocidad de líquido no es simétrico. Para el caso de flujo tapón la velocidad del líquido y de las burbujas en el centro del canal es considerablemente mayor que en las paredes. Vasallo y Kumar también observaron que cuando se generan burbujas grandes la velocidad promedio de las mismas se incrementa con la fracción volumétrica. Cuando las burbujas son pequeñas se observa la tendencia opuesta.

En otra investigación Sun *et al.* (2002) realizan experimentos con circulación de líquido corriente arriba en un canal circular utilizando simultáneamente las técnicas LDA Y HFA. Sus perfiles de velocidad concuerdan con el trabajo de Vasallo. En el centro del canal la velocidad media del líquido es ligeramente mayor que en las paredes. Con el anemómetro de película caliente, Sun *et al.* obtienen mediciones de fracción volumétrica local y detectan que en las paredes la concentración de gas es ligeramente mayor que a lo largo de todo el diámetro. Gurau *et al.* (2004) realizaron mediciones de velocidad local de líquido y gas mediante el método de correlación cruzada entre dos señales provenientes de una sonda de anemómetro de película caliente tipo *doble*. Los experimentos se realizan a diferentes gastos volumétricos de líquido y diferentes gastos volumétricos de gas. En el caso particular en que se

mantiene el flujo de gas constante y se varía el gasto de líquido, se observa que la velocidad de las burbujas aumenta proporcionalmente conforme se incrementa el gasto. Cuando se mantiene el flujo de líquido constante y se varía el gasto de gas se detecta que la velocidad media de las burbujas se incrementa con el gasto.

La referencia más relevante para la presente tesis es el trabajo realizado por Martínez (2003) en donde se obtuvieron mediciones de velocidad de burbujas utilizando puntas de impedancia a las mismas condiciones experimentales que en esta investigación.

### 1.6.3. Agitación de líquido

A partir de mediciones de velocidad, modelos matemáticos y simulaciones numéricas se han realizado numerosos estudios de la naturaleza turbulenta de la fase continua en un flujo burbujeante. Entre ellos los más importantes son los de Serizawa *et al.* (1975), Wijngaarden (1976), Theofanous and Sullivan (1982), Risso y Ellingsen (2002), Bunner y Tryggvason (2002) y Chahed *et al.* (2003). La agitación del líquido originada por el movimiento de las partículas ha sido llamada por algunos autores como pseudo-turbulencia. Lance y Bataille (1991), así como Wijngaarden (1998), realizaron experimentos con flujos burbujeantes, y calcularon la energía cinética relacionada al movimiento de las burbujas. Lance y Bataille encontraron que a cierto valor bajo de  $\alpha$ , las fuerzas hidrodinámicas entre burbujas son despreciables. Para valores mayores de  $\alpha$ , estos autores encontraron que las burbujas transfieren una gran cantidad de energía cinética al líquido. Zenit *et al.* (2001) realizaron experimentos con suspensiones de burbujas monodispersas en un canal vertical. En sus experimentos no existe circulación de líquido. Obtuvieron mediciones de velocidad de líquido mediante un anemómetro de película caliente estático. Encontraron un incremento en el valor de la variancia de la velocidad del líquido a mayores fracciones volumétricas de gas. Observaron además que la agitación en la dirección vertical es significativamente mayor que en la horizontal. Zenit *et al.* reportan una señal de velocidad fluctuante de líquido. La estructura de esta señal es diferente a la obtenida con el sensor en movimiento. En la sección 2.5 se explicará con más detalle la diferencia entre ambas señales. Cartellier y Riviere (2001) realizaron estudios de la agitación inducida por burbujas en flujos burbujeantes uniformes, para  $Re=O(1)$  y  $Re=O(10)$ . Los experimentos fueron realizados en un canal vertical con circulación de líquido y las mediciones de velocidad de la fase continua se realizó mediante la técnica de velocimetría por láser Doppler. Para números de Reynolds pequeños se encontró que la agitación axial del líquido se incrementa linealmente con  $\alpha/Re$ . En cambio para número de Reynolds moderados  $Re=O(10)$  se encontró una relación  $var[V_L]/U_B = (\alpha/Re)^{2/3}$ , donde  $V_L$  y  $U_B$  son la velocidad de líquido y velocidad media de las burbujas respectivamente.

## Capítulo 2

# Desarrollo Experimental

En este capítulo se muestran las características y el funcionamiento del dispositivo experimental, se presenta la descripción del flujo estudiado en los experimentos y se explica con detalle la técnica de medición y el procesamiento de datos.

### 2.1. Descripción general del dispositivo experimental

El dispositivo experimental consiste de un canal de sección rectangular de  $10 \times 5$  cm y altura de 1 m dentro del cual se tiene un líquido con características conocidas. La figura 2.1 muestra un esquema del experimento. En la parte inferior se acopla una sección donde se introduce nitrógeno gaseoso. La cantidad de gas que entra al canal es controlada mediante un flujómetro. Para generar burbujas, el gas es inyectado a través de un arreglo de capilares de 0.15 mm de diámetro interno. En la parte superior del canal se encuentra montado un mecanismo que permite dar movimiento vertical al sensor de película caliente. La señal analógica proveniente del sensor es acondicionada electrónicamente en el equipo de anemometría de hilo caliente. Posteriormente la señal es digitalizada y analizada en una computadora. El control del movimiento del sensor se realiza a través de la computadora. Las mediciones de la velocidad de traslación de la punta o sensor, así como las fotografías de las burbujas, se realizan con una cámara de alta velocidad.

### 2.2. Descripción del flujo

El flujo que se estudia en el presente trabajo es un flujo bifásico burbujeante monodisperso, es decir, la distribución de las burbujas en la mezcla es homogénea y además su tamaño es aproximadamente el mismo. Se utilizaron cuatro líquidos newtonianos con diferente viscosidad: agua ( $18 \text{ M}\Omega \text{ cm}$  a la salida del purificador),

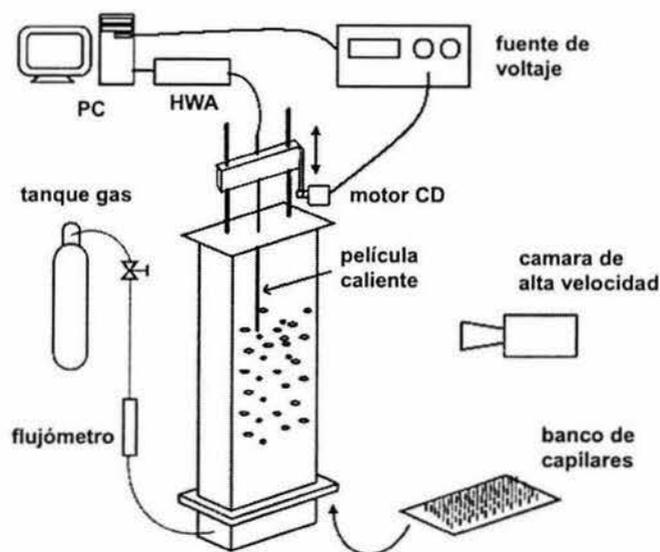


Figura 2.1: Dispositivo experimental.

soluciones de agua con glicerina al 15, 30 y 50 por ciento en peso. La tabla 2.1 muestra las propiedades físicas de estos líquidos. La viscosidad se midió con un reómetro AR1000-N, TA instruments.

Todas las soluciones contienen  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (sulfato de magnesio 7-Hidrato) al 5 % molar con el fin de reducir la coalescencia entre las burbujas. Lessard y Zieminski (1971) demostraron que a cierta concentración de esta sal en soluciones acuosas se puede prevenir la coalescencia en columnas burbujeantes. Las soluciones de agua-glicerina contienen además benzoato de sodio para evitar la generación de bacterias y otros agentes biológicos.

El flujo de gas nitrógeno es controlado por un flujómetro Gilmont con las características mostradas en la tabla 2.2. La lectura del flujo se realiza tomando en cuenta la escala del instrumento y una tabla de calibración a presión y temperatura en condiciones estándar.

El arreglo de capilares está formado por cilindros de acero inoxidable de 0.3 mm de diámetro externo, 0.15 mm de diámetro interno y una longitud de 4 cm. La figura 2.2(a) muestra el banco de capilares generando burbujas.

Cabe señalar que los capilares deben tener las mismas dimensiones de manera que se puedan obtener burbujas aproximadamente del mismo tamaño. El banco consta

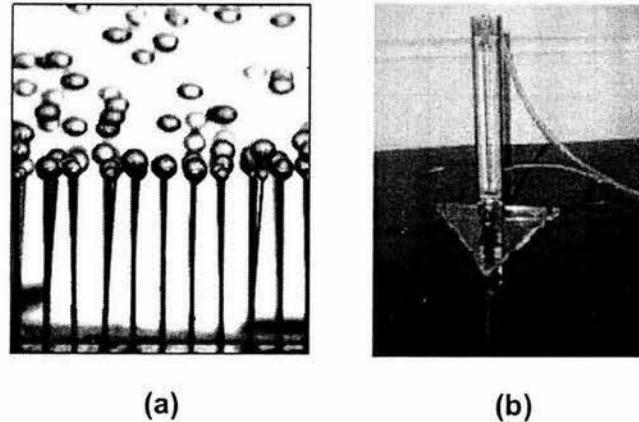


Figura 2.2: (a) Fotografía de capilares generando burbujas (b) Flujómetro Gilmont.

líquido	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] x10 <sup>3</sup>	$\sigma$ [N/m <sup>2</sup> ] x10 <sup>-3</sup>	$\mu$ (medida) [Pa s] x10 <sup>-3</sup>	$\mu$ (tabla) [Pa s] x10 <sup>-3</sup>
agua	0.9982	72.04	1.000	1.000
a-g 15 %	1.0345	69.84	1.657	1.535
a-g 30 %	1.0793	66.56	2.412	2.500
a-g 50 %	1.1263	64.57	5.830	6.000

Cuadro 2.1: Propiedades físicas de los líquidos utilizados.

de 293 capilares dispuestos en arreglos hexagonales con una separación de 4 mm entre vértices. Esta distribución de capilares permite asegurar la mayor densidad de ellos para un área específica. El diseño y construcción del arreglo de capilares fue realizado por Martínez (2003).

La medición de la fracción volumétrica de gas presente en la mezcla se realiza tomando en cuenta la altura de la columna del líquido sin burbujas y la altura de la mezcla tal como se muestra en la figura 2.3. La relación para obtener la fracción volumétrica de gas en la mezcla es:

$$\alpha = \frac{Vol_{gas}}{Vol_{total}} = \frac{H_m - H_l}{H_m} \quad (2.1)$$

donde  $H_l$  es el nivel de líquido sin la presencia de las burbujas y  $H_m$  es el nivel de la mezcla líquido-burbujas.

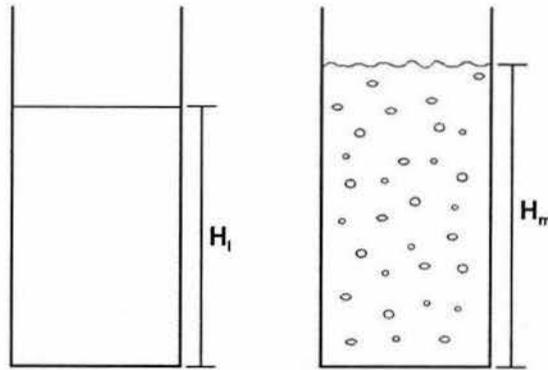


Figura 2.3: Medición de niveles.

Flujómetro	
flotador	acero inoxidable 316
presión máxima	200 psi
precisión	5% de la escala
rango de temperaturas	-26-121°C
conectores	1/8 pulg. NPT hembra
Rango de medición gas	460-4562 ml/min
Rango de medición agua	5.4-133 ml/min

Cuadro 2.2: Características del flujómetro.

Para la obtención de fotografías de las burbujas se utilizó una cámara digital Fujifilm Finepix S1 Pro de alta resolución (6.13 millones de píxeles). También se grabaron secuencias de imágenes de ascenso de burbujas, para lo cual se utilizó una cámara de alta velocidad. La cámara es de la marca Redlake con las siguientes características: cuenta con un lente CCD, velocidades de grabación de 50 hasta 8000 cuadros por segundo, su resolución va desde 60 x 68 píxeles hasta 480 x 420 píxeles dependiendo de la velocidad de grabación. La cámara cuenta con una tarjeta PCI que se instala en una computadora desde donde se controlan sus funciones.

### 2.3. Traslación del sensor

Los equipos de medición de velocidad como el anemómetro de película caliente requieren la existencia de un flujo pasando a través del sensor. En el experimento,

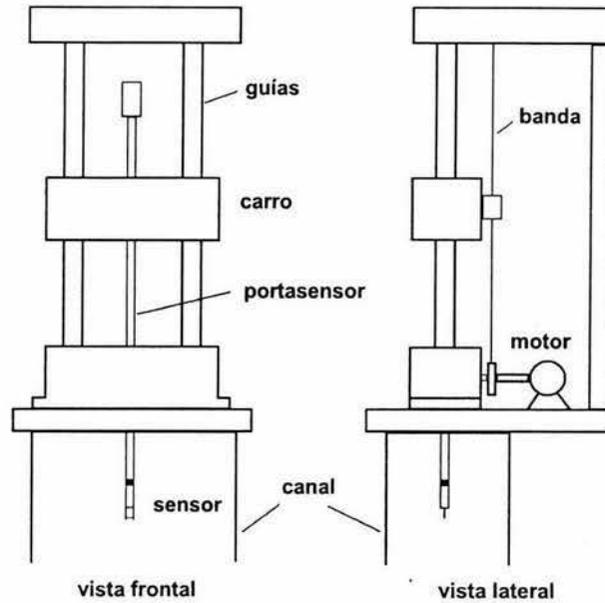


Figura 2.4: Mecanismo para movimiento del sensor.

la velocidad media del líquido es cercana a cero, ya que no se induce externamente desplazamiento a la fase líquida; por tanto es necesario implementar una velocidad artificial que en este caso es la traslación del sensor a una velocidad constante determinada. Las terminales electrónicas del sensor de película caliente se conectan a un cilindro de 3/16 de pulgada de diámetro y 46 cm de largo. Dicho cilindro o portasensor es colocado en un carro, el cual se mueve a través de dos barras de acero verticales tal como se muestra en la figura 2.4. Para evitar fricción, la pared interna de los agujeros del carro está revestida de teflón. El portasensor se hace pasar por una base fija la cual tiene un orificio del mismo diámetro que el portasensor, el agujero también está revestido con teflón. El objetivo principal de la base es disminuir las vibraciones como producto del movimiento del portasensor. Se tiene una banda dentada que pasa por un engrane atornillado en la base fija y por una polea montada en la parte superior de las barras, el engrane a su vez es movido por el eje de un motor eléctrico de corriente directa, dispuesto en la parte posterior del mecanismo.

El movimiento del motor es controlado por una fuente de poder que genera diferentes voltajes y corriente continua. La fuente de poder es controlada en la computadora a través del puerto serial. De esta manera pueden establecerse diferentes voltajes para obtener diferentes revoluciones en el motor. Las características princi-

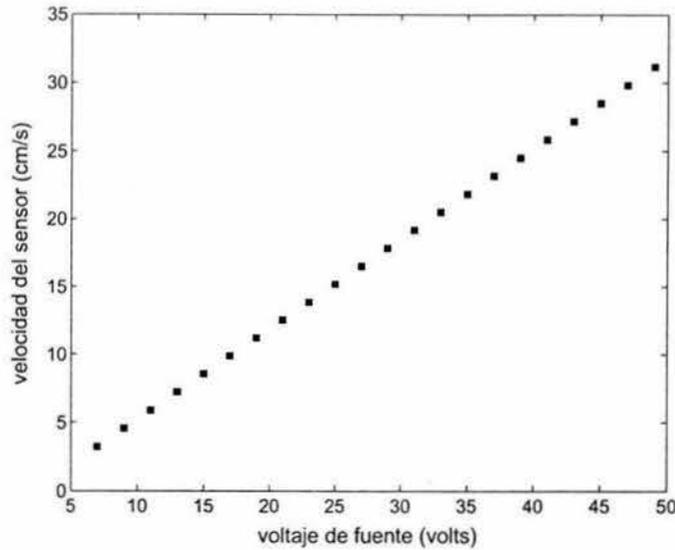


Figura 2.5: Gráfica velocidad de traslación del sensor vs voltaje de fuente.

pales del motor (valores máximos) son: 90 DC, 0.49 amperes, 344 RPM, 29.82 Watts (1/25 HP), 0.5764 N m torque. La figura 2.5 muestra la relación entre el voltaje de la fuente y la velocidad de traslación de la punta.

## 2.4. Obtención de datos

Como se explicó anteriormente, la respuesta del sensor conectado a un puente electrónico Wheatstone es una señal de voltaje analógica  $E_B$  (voltaje de puente) la cual es acondicionada en el equipo de anemometría de hilo caliente. El equipo utilizado es un anemómetro TSI IFA 300.

Los componentes de un sistema de medición digital típico se muestran en la figura 2.6. Generalmente, el voltaje de puente se hace pasar en primer lugar por un filtro de frecuencias *pasa baja* para eliminar el ruido electrónico de alta frecuencia. Posteriormente la señal es alimentada a una unidad de acondicionamiento de señal. Aquí se resta al voltaje de puente el voltaje de compensación  $E_{off}$  para que la señal esté promediada en 0 volts y después se le aplica una ganancia  $G$ . El propósito de la unidad de acondicionamiento es ajustar la señal de voltaje de salida  $E$  al rango de voltaje de entrada del convertidor analógico-digital (A/D). El convertidor Power-DAQ, modelo PD2-MfS-4-1M-12, se encuentra instalado en una ranura PCI de la

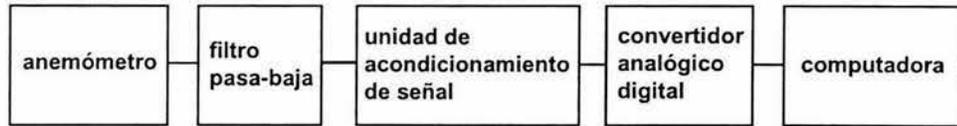


Figura 2.6: Sistema de medición digital.

computadora. Las especificaciones del convertidor analógico-digital más importantes son: rango de voltaje, resolución y frecuencia de muestreo. El rango de voltaje del convertidor usado en este experimento es:  $\pm 5$  V. El segundo punto es la resolución del convertidor, el cual divide el rango de voltaje de entrada en  $2^m$  valores diferentes, donde  $m$  son bits de datos. La resolución del convertidor es de 12 bits. La frecuencia máxima de la tarjeta de adquisición es de 1 MHz. La frecuencia de muestreo puede especificarse en el software del anemómetro de hilo caliente. Para la mayoría de las mediciones se escogió un valor de 10 kHz.

## 2.5. Calibración del sensor

Antes de comenzar las mediciones de velocidad de la mezcla gas-líquida debe realizarse la calibración del sensor. Es importante mencionar que la calibración se realiza en ausencia de burbujas, es decir, únicamente con la fase líquida. El procedimiento consiste en mover la punta hacia abajo a diferentes velocidades conocidas. La distancia de recorrido del sensor es de aproximadamente 25 cm. El movimiento del sensor comienza a 5 cm de la superficie de líquido. Las velocidades de traslación del sensor se miden con la cámara de alta velocidad. Para cada velocidad de traslación se obtiene una señal de voltaje. Cada velocidad es relacionada con el promedio del voltaje obtenido. En la figura 2.7 se muestran tres señales de voltaje cuando el sensor se encuentra en movimiento. Puede observarse el incremento de voltaje al aumentar la velocidad de traslación de la punta. En el presente trabajo se utilizaron 22 velocidades de traslación diferentes que van desde 3 cm/s hasta 30 cm/s aproximadamente. Así, puede obtenerse una curva como la mostrada en la figura 2.8. La relación entre el voltaje promedio y la velocidad de traslación de la punta no es lineal pero puede usarse la ecuación de ajuste 1.11. El valor de  $n$  para un sensor de película caliente sumergido en líquido es aproximadamente  $1/3$ . Los coeficientes A y B son calculados resolviendo la ecuación y de esta manera pueden convertirse todos los datos de voltaje en datos de velocidad.

Para describir el procesamiento de datos se muestra a continuación el procedi-

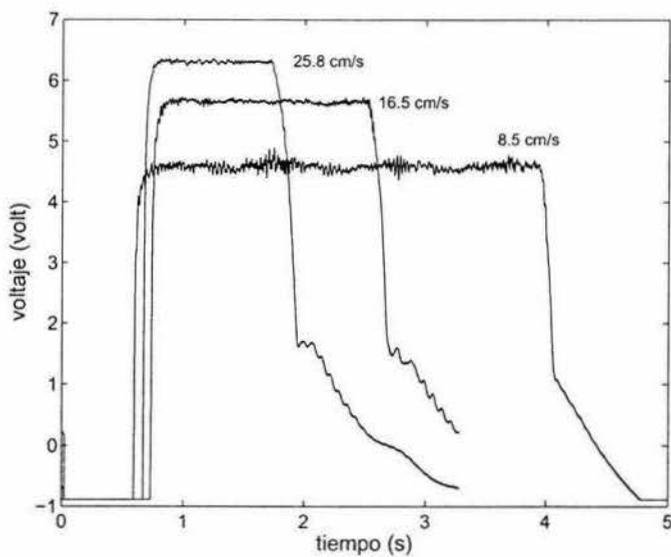


Figura 2.7: Señales de voltaje típicas para tres velocidades de traslación del sensor.

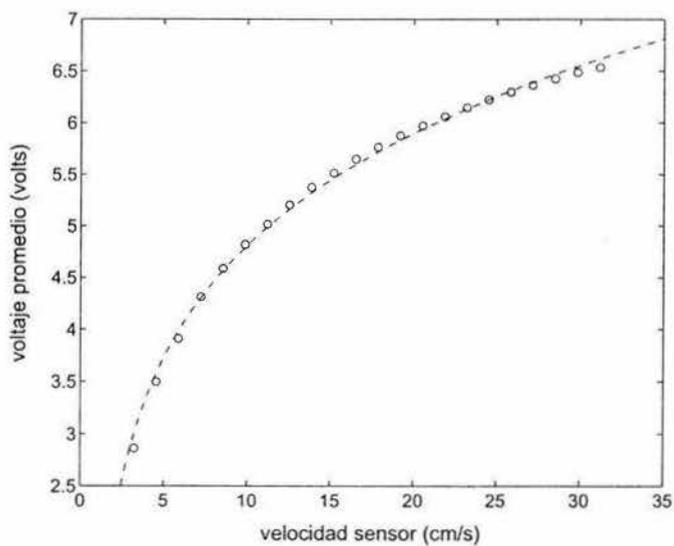


Figura 2.8: Datos de calibración del sensor de película caliente y su curva de ajuste.

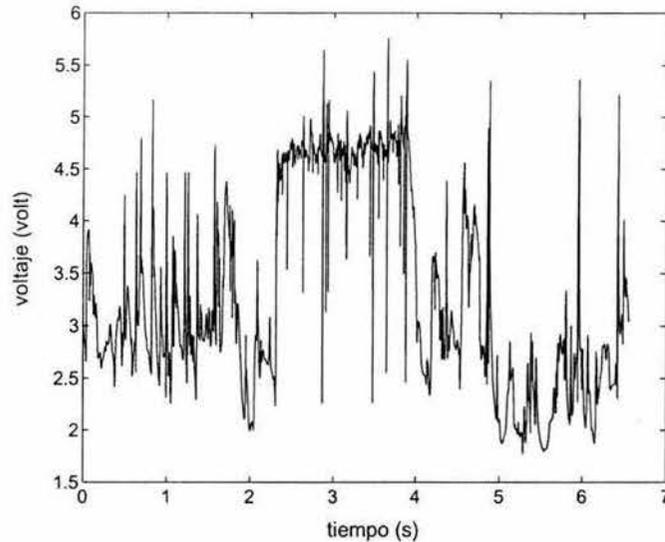


Figura 2.9: Señal de voltaje de flujo agua-burbujas,  $\alpha = 0.0084$  y velocidad de sensor  $17.85 \text{ cm/s}$ .

miento para obtener una señal de velocidad para un experimento en particular. En la figura 2.9 se muestra la señal de voltaje de un experimento correspondiente a un flujo de agua con burbujas, fracción volumétrica  $\alpha = 0.0084$  y una velocidad de traslación del sensor de  $17.85 \text{ cm/s}$ . El intervalo de tiempo en el cual el sensor está en movimiento es la zona de la señal de interés para realizar el procesamiento de la señal. Para el caso mostrado esto corresponde al intervalo entre  $t = 2.2 \text{ s}$  y  $t = 3.9 \text{ s}$ . Con la ecuación de ajuste se convierten todos los datos de voltaje en velocidad. Así, se obtiene la señal de velocidad mostrada en la figura 2.10. Pueden notarse cambios súbitos del valor de la velocidad que están relacionados con los contactos de las burbujas y el sensor. También se puede diferenciar la zona de movimiento del sensor que es el intervalo de la señal donde la velocidad promedio tiene un valor mayor a  $15 \text{ cm/s}$ . Es importante observar que la estructura de la señal de velocidad cuando el sensor está estático es diferente a la estructura de la señal cuando el sensor está en movimiento. La medición de velocidad que se obtiene cuando no existe circulación de fluido y la punta está estática es errónea debido a que el sensor no puede interpretar correctamente el sentido de las velocidades locales. Se hablará más al respecto en la sección 3.1.

El procedimiento comienza determinando los límites dentro de los cuales el sensor

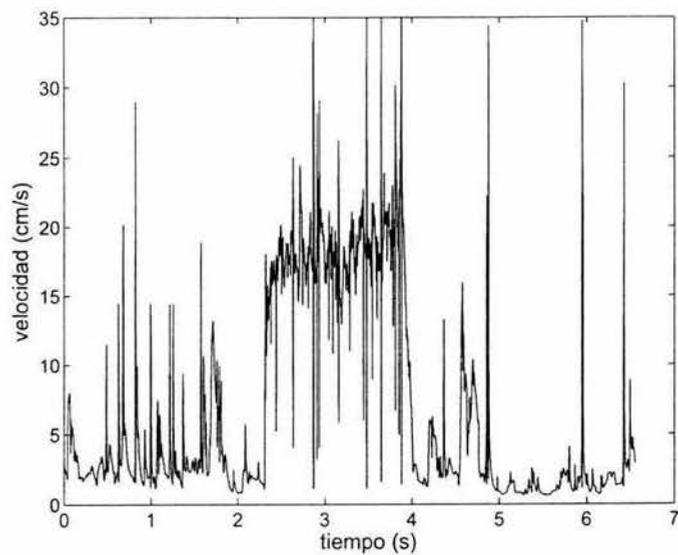


Figura 2.10: Señal de velocidad correspondiente a la señal de voltaje de la figura 2.9.

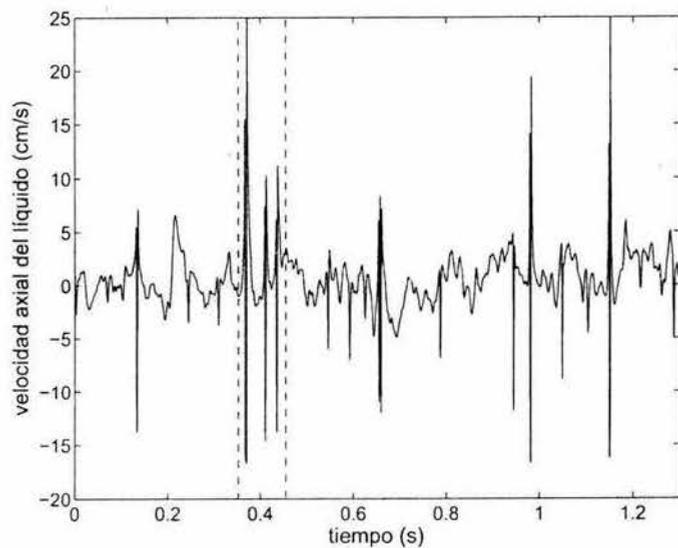


Figura 2.11: Señal de velocidad mostrando el intervalo de movimiento del sensor, habiendo restado su velocidad de traslación.

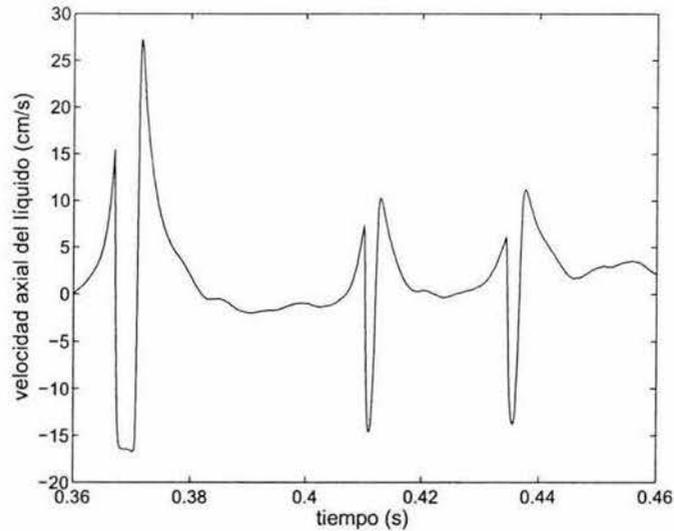


Figura 2.12: Señal de velocidad mostrando en detalle tres contactos de burbujas con el sensor.

está en movimiento; así se elimina la parte de la señal que no está dentro de ese intervalo. A la señal obtenida se le resta la velocidad impuesta al sensor, en este caso 17.85 cm/s; así, se obtiene la señal de velocidad mostrada en la figura 2.11. Esta señal muestra la velocidad fluctuante de la fase continua junto con los choques de burbujas. La señal fluctúa alrededor de cero tal como se espera.

Los contactos de las burbujas con el sensor se muestran en la figura 2.12, que es simplemente un acercamiento de la señal mostrada en la figura 2.11 (intervalo entre líneas punteadas). En esta gráfica pueden observarse tres discontinuidades que corresponden a los choques consecutivos de tres burbujas con el sensor. Todos los contactos tienen en esencia las mismas características en todos los experimentos realizados en este trabajo.

Es importante mencionar que la duración del choque así como la intensidad de la discontinuidad pueden variar debido a diferentes razones. Los choques pueden ser completos o parciales; es decir, el sensor puede tocar a una burbuja en su parte central o lateral. La velocidad relativa entre el sensor y la burbuja puede variar, el tiempo de contacto es diferente en cada caso; adicionalmente, las burbujas pueden tener diferentes tamaños dependiendo de la solución y la fracción volumétrica. En el presente trabajo es de interés obtener la medición de la velocidad fluctuante de la fase continua, los cambios súbitos del valor de la velocidad en la señal se deben al

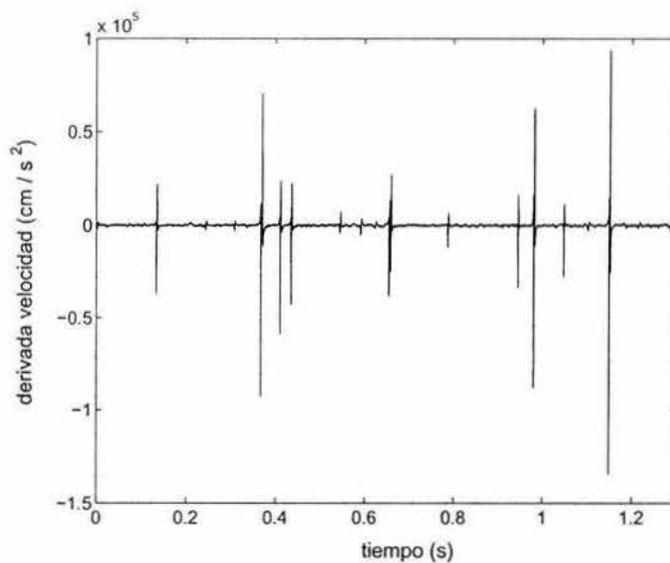


Figura 2.13: Primera derivada de la señal de velocidad.

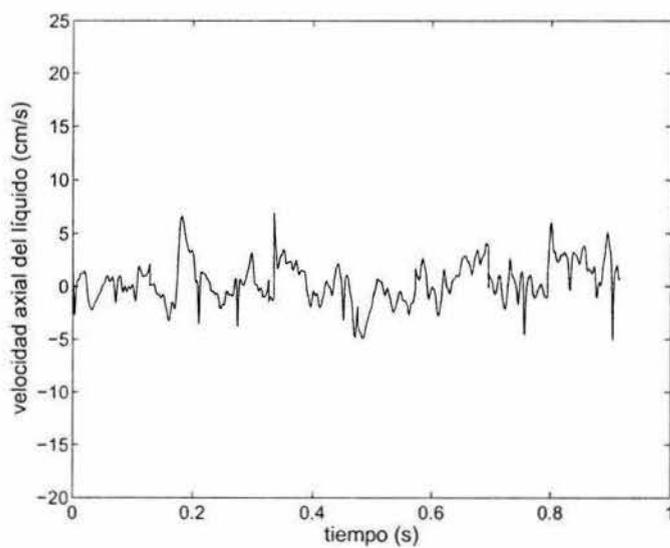


Figura 2.14: Señal mostrando la velocidad fluctuante de la fase líquida eliminando los choques de burbujas.

cambio de transferencia de calor entre el sensor y el medio circundante que en el caso de una burbuja es gas nitrógeno. El intervalo de tiempo en el que una burbuja toca el sensor debe ser eliminado de la señal ya que no muestra el comportamiento real de la velocidad fluctuante del líquido. El análisis detallado de la interacción entre el elemento sensor y una burbuja se reporta en el siguiente capítulo.

En la figura 2.13 se muestra el cálculo de la primera derivada de la señal de velocidad de la figura 2.11, en otras palabras, la aceleración del fluido  $\Delta U/\Delta t$ . En esta gráfica pueden observarse un número finito de discontinuidades que representan contactos de diferente intensidad. Después de un análisis estadístico se determinó el valor de derivada de velocidad mínimo (umbral) para el cual se considera que ha comenzado un choque y el tiempo promedio de duración del mismo.

Con estos datos pueden excluirse de la señal los intervalos de tiempo en donde existen choques de burbujas. Cabe señalar que es muy importante determinar el valor de umbral y duración de choque más adecuados ya que un valor alto de umbral puede no excluir choques en la señal y un valor muy bajo de umbral puede eliminar mucha información de las fluctuaciones del líquido. El umbral tiene un valor entre  $0.5 \times 10^4$  y  $1.0 \times 10^4$  cm/s<sup>2</sup>. En la figura 2.14 se muestra, finalmente, la señal de velocidad fluctuante resultante después de eliminar los choques de burbujas. De esta señal se obtienen las mediciones de la naturaleza fluctuante de estos flujos.

## 2.6. Medición de dos componentes de velocidad

En la presente tesis también se realizaron mediciones de dos componentes de velocidad para obtener las características del flujo bifásico en dos direcciones. La velocidad  $U$  corresponde a la dirección del movimiento de traslación del sensor, velocidad vertical, mientras que la velocidad  $V$  corresponde a la dirección horizontal. Las mediciones de dos componentes de velocidad pueden llevarse a cabo ya sea con una sonda de un solo alambre inclinado con respecto a la dirección del flujo principal llamado  $SY$  (*single yawed*) o con una sonda consistente de dos alambres dispuestos en una configuración  $X$  ( $X$  probe). Esta última configuración permite la medición simultánea de dos componentes de velocidad mientras que la primera sonda solo puede medir una velocidad a la vez. El campo de velocidad será descrito con el vector de velocidad  $Q$  en el punto donde se encuentra el elemento sensor para un instante dado. Dicho vector varía con el tiempo para un flujo turbulento. El voltaje de salida del anemómetro es  $E$ . Como se explicó en el capítulo anterior, la ecuación de respuesta del anemómetro de película caliente puede expresarse en su forma más general como la ley de potencia

$$E^2 = A + BU_e^n \quad (2.2)$$

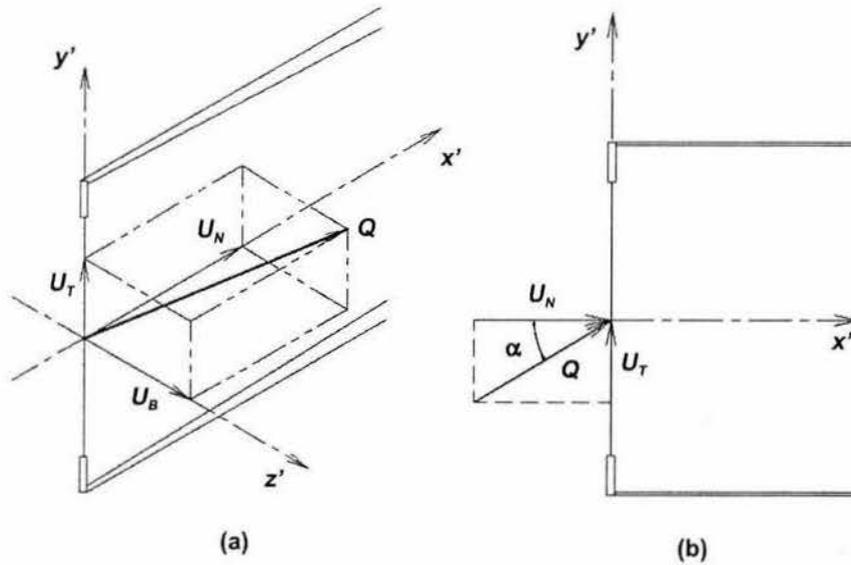


Figura 2.15: Sistema coordenado para un sensor de película caliente y sus velocidades correspondientes. (a) sistema general (b) sistema para un flujo bidimensional.

donde  $U_e$  es la velocidad efectiva, la cual está relacionada con el vector de velocidad  $Q$ . Considérese el sistema coordenado  $(x', y', z')$ , tal como se ilustra en la figura 2.15(a). Los ejes  $x'$  y  $y'$  están generalmente ubicados en el plano de los soportes del alambre. El vector velocidad  $Q$  puede ser expresado en términos de sus tres componentes de velocidad,  $U_N$  (normal),  $U_T$  (tangencial) y  $U_B$  (binormal). Si la respuesta del elemento sensor a las tres componentes de velocidad fuera la misma, la velocidad efectiva  $U_e$  sería igual al vector velocidad  $Q$ . Sin embargo, la película caliente tiene respuestas diferentes a las tres componentes; en particular, la sensibilidad a la velocidad tangencial  $U_T$  es muy pequeña. Una relación comúnmente usada, que toma en cuenta estos factores y define la velocidad efectiva es

$$U_e^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2 \quad (2.3)$$

donde  $k$  y  $h$  son factores que determinan la sensibilidad del sensor a las velocidades tangencial y binormal. El caso particular en que se tiene un flujo bidimensional y los soportes se encuentran en un plano paralelo al flujo se muestra en la figura 2.15(b). La velocidad efectiva es

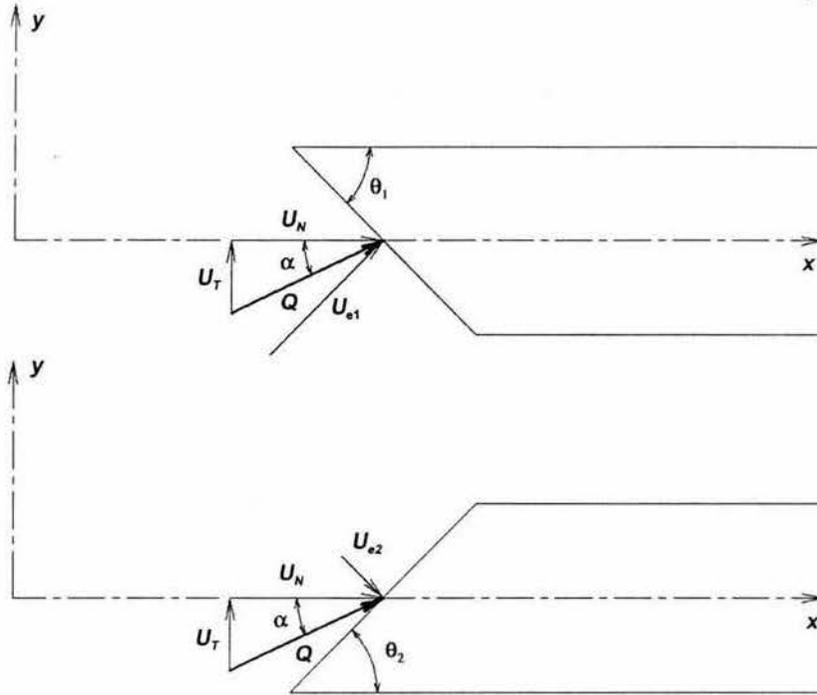


Figura 2.16: Sistema coordenado de un sensor con alambre inclinado para mediciones de dos componentes de velocidad.

$$U_e^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2$$

$$U_e^2 = Q^2 \cos^2 \alpha + k^2 Q^2 \sin^2 \alpha.$$

Considerando que la sensibilidad a la velocidad tangencial es muy pequeña comparada con la velocidad normal, se tiene, tomando la ecuación 2.2

$$E^2 = A + B(Q \cos \alpha)^n \quad (2.4)$$

para un elemento sensor. Para obtener las dos componentes de velocidad es necesario tener dos alambres 1 y 2 (configuración X) dispuestos de la forma como se muestra en la figura 2.16. Nótese que el alambre está inclinado respecto a los soportes. Es suficiente usar un solo alambre (SY) pero hay que girarlo sobre su propio eje para

obtener las dos velocidades. La obtención de las velocidades efectivas usando el sensor inclinado no se hace de manera simultánea, por tanto los datos generados solo pueden usarse para fines estadísticos. La configuración de la figura 2.16 muestra el caso general en que el flujo principal  $Q$  no es paralelo a los soportes. Se supone que la velocidad efectiva depende exclusivamente de la respuesta del sensor a la velocidad normal, es decir,  $U_e = U_N$ . Se tiene entonces

$$U_{e1} = Q \sin(\theta_1 + \alpha) \quad (2.5)$$

$$U_{e2} = Q \sin(\theta_2 - \alpha) \quad (2.6)$$

donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos entre los soportes y el elemento sensor. Sustituyendo en la ecuación 2.2 se tiene:

$$E_1^2 = A_1 + B_1 U_{e1}^n \quad (2.7)$$

$$E_2^2 = A_2 + B_2 U_{e2}^n \quad (2.8)$$

donde  $E_1$  y  $E_2$  son los voltajes de salida correspondientes a los alambres 1 y 2. Las constantes  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  y  $B_2$  son coeficientes de calibración. Haciendo uso de las relaciones trigonométricas

$$\sin(a + b) = \sin a \cos b + \cos a \sin b$$

$$\sin(a - b) = \sin a \cos b - \cos a \sin b$$

se tiene

$$(E_1^2 - A_1)^{1/n} = B_1^{1/n} (Q \sin \theta_1 \cos \alpha + Q \cos \theta_1 \sin \alpha) \quad (2.9)$$

$$(E_2^2 - A_2)^{1/n} = B_2^{1/n} (Q \sin \theta_2 \cos \alpha - Q \cos \theta_2 \sin \alpha). \quad (2.10)$$

El vector  $Q$  puede ser expresado a través de sus componentes de velocidad

$$U_N = U = Q \cos \alpha$$

$$U_T = V = Q \sin \alpha$$

por tanto, sustituyendo se tiene

$$(E_1^2 - A_1)^{1/n} = B_1^{1/n} \sin \theta_1 U + B_1^{1/n} \cos \theta_1 V \quad (2.11)$$

$$(E_2^2 - A_2)^{1/n} = B_2^{1/n} \sin \theta_2 U - B_2^{1/n} \cos \theta_2 V. \quad (2.12)$$

Considerando el caso particular en que se tiene un flujo  $Q$  unidimensional y uniforme conocido, y la sonda se coloca de manera que los soportes sean paralelos al flujo principal, entonces  $\alpha = 0$  y se tiene

$$E_1^2 = A_1 + B_1(Q \sin \theta_1)^n \quad (2.13)$$

$$E_2^2 = A_2 + B_2(Q \sin \theta_2)^n. \quad (2.14)$$

Con estas ecuaciones puede calcularse independiente los coeficientes  $A_1$  y  $B_1$  para el alambre 1 y los coeficientes  $A_2$  y  $B_2$  para el alambre 2. Se supone que los valores de  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son conocidos; en la mayoría de los casos  $\theta_1 = \theta_2$ . El valor de  $n$  en el caso de película caliente sumergida en líquido es aproximadamente de  $1/3$ . De esta manera se realiza la calibración de ambos sensores y con el sistema de ecuaciones 2.11 y 2.12 pueden calcularse las dos componentes de velocidad ya que  $U = f_1(E_1, E_2)$  y  $V = f_2(E_1, E_2)$ .



## Capítulo 3

# Resultados

En este capítulo se presentan las mediciones obtenidas en el experimento para diferentes líquidos y diferentes fracciones volumétricas. Con la finalidad de mostrar el desempeño de la técnica de medición propuesta, se realiza un estudio de validación de los datos registrados. Se efectúa un análisis de las mediciones obtenidas para verificar la respuesta del sensor cuando se encuentra en movimiento. Se presentan las características del flujo (tamaño y forma de las burbujas) y las señales de velocidad de los diferentes experimentos. Se muestran también detalles de la interacción de una burbuja con el sensor de película caliente. Se realiza el análisis de las señales de velocidad para la obtención de la agitación de la fase continua a diferentes condiciones de flujo y finalmente se comparan los resultados obtenidos con resultados reportados por otros autores.

### 3.1. Validación

Para verificar el funcionamiento del sistema de medición propuesto se consideraron tres puntos principales: a) el ruido de la señal de velocidad sin burbujas comparado con la fluctuación de las señales de velocidad con burbujas b) el cálculo de la velocidad media axial del líquido  $\bar{U}$  a diferentes velocidades de traslación del sensor y diferentes concentraciones de gas y c) el cálculo de la variancia de la señal a diferentes velocidades de traslación. Las mediciones de velocidad así como el análisis de datos preliminares se realizaron con los cuatro líquidos.

La figura 3.1 muestra el espectro de frecuencias (ver sección 1.5) de las señales de velocidad en agua:  $\alpha = 0.0084$ ,  $\alpha = 0.0267$  y líquido sin burbujas. La velocidad de traslación del sensor de las tres señales es de 17.85 cm/s. La duración de la señal es de 1250 ms aproximadamente. La señal proveniente de la medición de la velocidad del líquido sin burbujas presenta fluctuaciones de baja frecuencia ( $< 100$  Hz). Estas

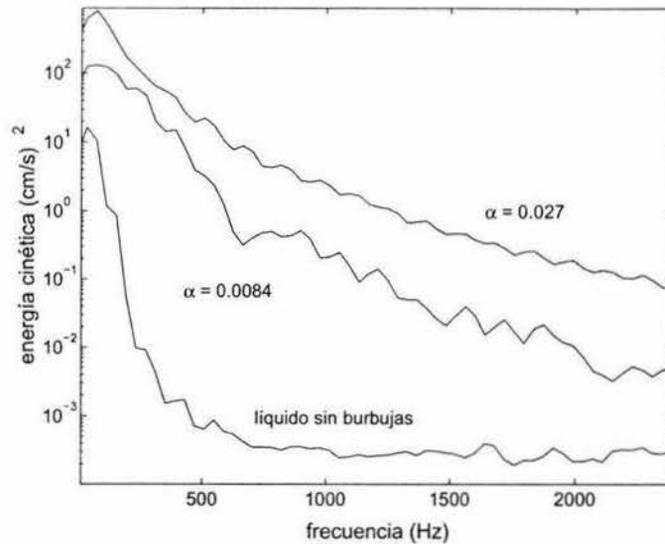


Figura 3.1: Espectro de frecuencias para las señales de velocidad (agua): líquido sin burbujas,  $\alpha = 0.0084$ ,  $\alpha = 0.0267$ . Velocidad de traslación 17.8 cm/s.

fluctuaciones pueden estar asociadas a la vibración del mecanismo de movimiento originada principalmente por el motor eléctrico. La energía asociada a la mayoría de las frecuencias presentes en esta señal es de baja intensidad comparada con la que se tiene en señales provenientes de experimentos con flujo burbujeante. Como es de esperarse las frecuencias originadas por la vibración, también se reflejan en las señales de velocidad de las mezclas agua-burbujas, pero es evidente que la energía en todo el rango de frecuencias es mayor que en la señal de velocidad de líquido sin burbujas. Para frecuencias  $200 \text{ Hz} < \omega < 1000 \text{ Hz}$ , existe una diferencia de tres órdenes de magnitud entre el espectro de frecuencia de la señal de velocidad de líquido con burbujas ( $\alpha = 0.0084$ ) y sin burbujas. Arriba de 1000 Hz la diferencia se reduce a dos órdenes de magnitud. Con esto puede mostrarse que el ruido inherente de la señal de velocidad (proveniente de la vibración) no afecta de manera determinante a la medición de la velocidad fluctuante del líquido. En general, el ruido característico de una señal proveniente de un sistema HWA puede deberse a muchos factores, entre ellos, al ruido electrónico generado por el propio sistema, a la perturbación del fluido por la presencia de los soportes del sensor, a la estela aguas abajo del cilindro sensible, etc. Con el fin de evitar la eliminación de información de la señal de velocidad, se determinó no realizar ningún tipo de filtro digital.

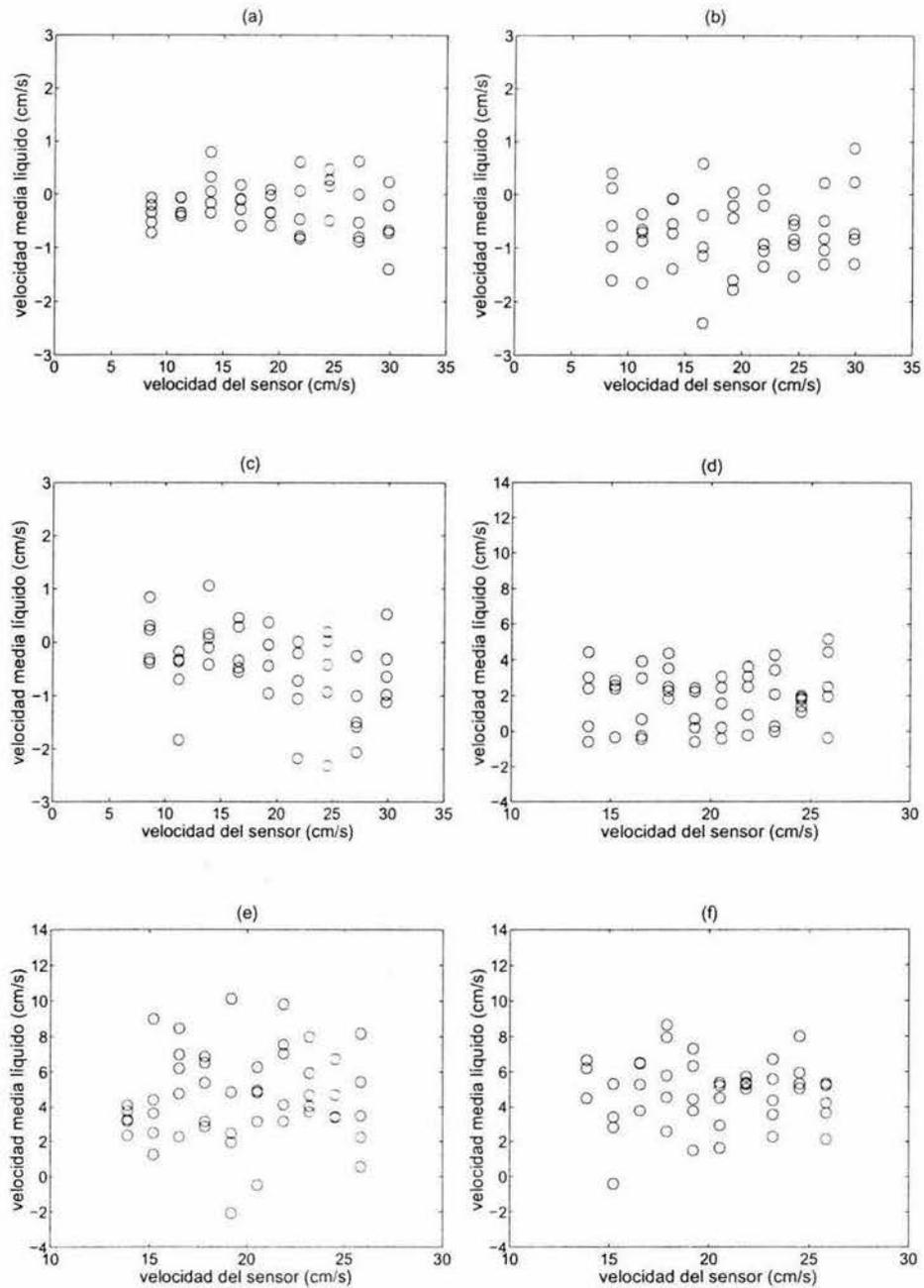


Figura 3.2: Velocidad media de líquido a diferentes velocidades de traslación. Agua: (a)  $\alpha = 0.0078$ , (b)  $\alpha = 0.0272$  y (c)  $\alpha = 0.0472$ . Agua-glicerina 30%: (d)  $\alpha = 0.0075$ , (e)  $\alpha = 0.0138$  y (f)  $\alpha = 0.0344$ .

La siguiente etapa de la validación fue analizar la velocidad media del líquido a diferentes velocidades de traslación del sensor y diferentes fracciones volumétricas. La finalidad de este estudio es determinar cómo afecta el movimiento del sensor a las mediciones de velocidad fluctuante de la fase continua. El procedimiento consiste en obtener mediciones de velocidad para todos los líquidos usando por lo menos 8 velocidades de traslación diferentes y fracciones volumétricas desde  $\alpha = 0.005$  hasta  $\alpha = 0.05$  aproximadamente. Para cada velocidad de traslación y fracción volumétrica se realizaron 5 experimentos. En la figura 3.2 se presenta la velocidad media del líquido para agua y agua-glicerina 30 %, utilizando velocidades de traslación que van desde 8.5 cm/s hasta 29.8 cm/s para agua y 13.8 cm/s hasta 27.1 cm/s para la solución de glicerina. En ambos casos se reporta la velocidad del líquido para tres fracciones volumétricas distintas. Agua: (a)  $\alpha = 0.0078$ , (b)  $\alpha = 0.0272$  y (c)  $\alpha = 0.0472$ . Agua-glicerina 30 %: (d)  $\alpha = 0.0075$ , (e)  $\alpha = 0.0138$  y (f)  $\alpha = 0.0344$ . En los experimentos con agua se observa que la mayoría de las velocidades de líquido se encuentran entre -2 y 1 cm/s. En particular, para la menor concentración de gas ( $\alpha = 0.0078$ ) el rango de velocidades es de -1 a 1 cm/s, lo cual puede decir que la velocidad media de líquido es aproximadamente cero. En todos los experimentos con agua se puede observar que la velocidad media de líquido permanece constante independientemente de la velocidad de traslación del sensor. Puede observarse además que la incertidumbre de la velocidad media se incrementa al aumentar la fracción volumétrica. En la siguiente sección se mostrará que al aumentar la fracción volumétrica se incrementa la variancia y también los contactos de burbujas provocando una mayor incertidumbre en los resultados.

En el caso de la solución de glicerina al 30 % se obtienen valores diferentes de velocidad media del líquido dependiendo de la concentración de gas. Por ejemplo, para  $\alpha = 0.0075$  el rango de velocidades de líquido está entre -0.5 y 4.5 cm/s. Para  $\alpha = 0.0344$  el rango está entre 1.5 y 8 cm/s. De lo último puede inferirse que existen corrientes locales de líquido y que la velocidad media aumenta al incrementar la fracción volumétrica. Más adelante se reporta la velocidad media de los diferentes líquidos a diferentes fracciones volumétricas a la misma velocidad de traslación del sensor. De forma similar que en los experimentos con agua, la velocidad media del líquido para una fracción volumétrica dada, no se ve afectada por el movimiento del sensor en los rangos de velocidad de traslación mostrados.

Después de realizar el análisis de la velocidad media del líquido se obtuvo el cálculo de la variancia de la velocidad fluctuante del líquido  $\text{var}[U]$ , a diferentes velocidades de traslación y fracciones volumétricas. Como se explicó anteriormente, la variancia es una medida de la agitación presente en el flujo. Se desea 1) estudiar el comportamiento de la variancia a diferentes velocidades de traslación y 2) determinar un rango de velocidades de traslación óptimo para los experimentos.

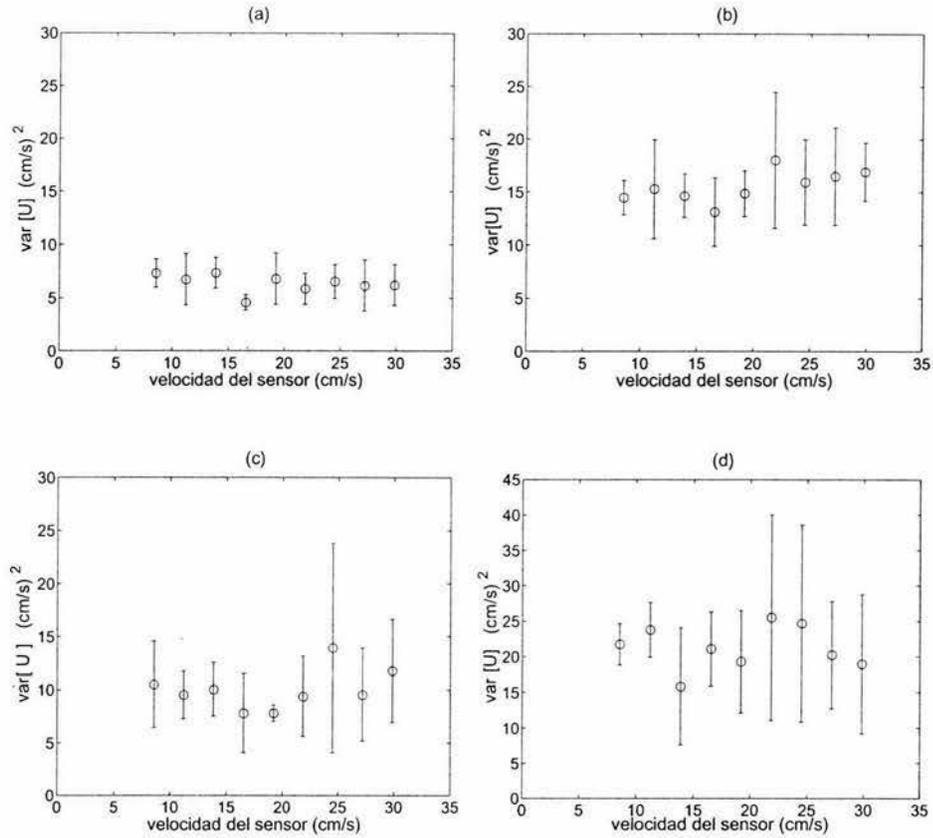


Figura 3.3: Variancia a diferentes velocidades de traslación: agua (a)  $\alpha = 0.0078$ , (b)  $\alpha = 0.0272$ ; agua-glicerina 15% (c)  $\alpha = 0.00547$ , (d)  $\alpha = 0.0308$ .

En las figuras 3.3 y 3.4 se muestran las gráficas de variancia a distintas velocidades de traslación para los cuatro líquidos: agua (a)  $\alpha = 0.0078$  (b)  $\alpha = 0.027$ ; agua-glicerina 15% (c)  $\alpha = 0.0054$  (d)  $\alpha = 0.031$ ; agua-glicerina 30% (e)  $\alpha = 0.0075$  (f)  $\alpha = 0.034$ ; agua-glicerina 50% (g)  $\alpha = 0.0110$  (h)  $\alpha = 0.025$ . Para cada velocidad de traslación se realizaron 5 experimentos. Para cada líquido se realizaron mediciones entre 8 y 10 fracciones volumétricas diferentes. Aquí se reportan dos por cada líquido. Las primeras pruebas se realizaron considerando nueve velocidades de traslación distintas a partir de 8.5  $\text{cm/s}$  hasta 29.8  $\text{cm/s}$  cubriendo así un rango amplio de velocidades.

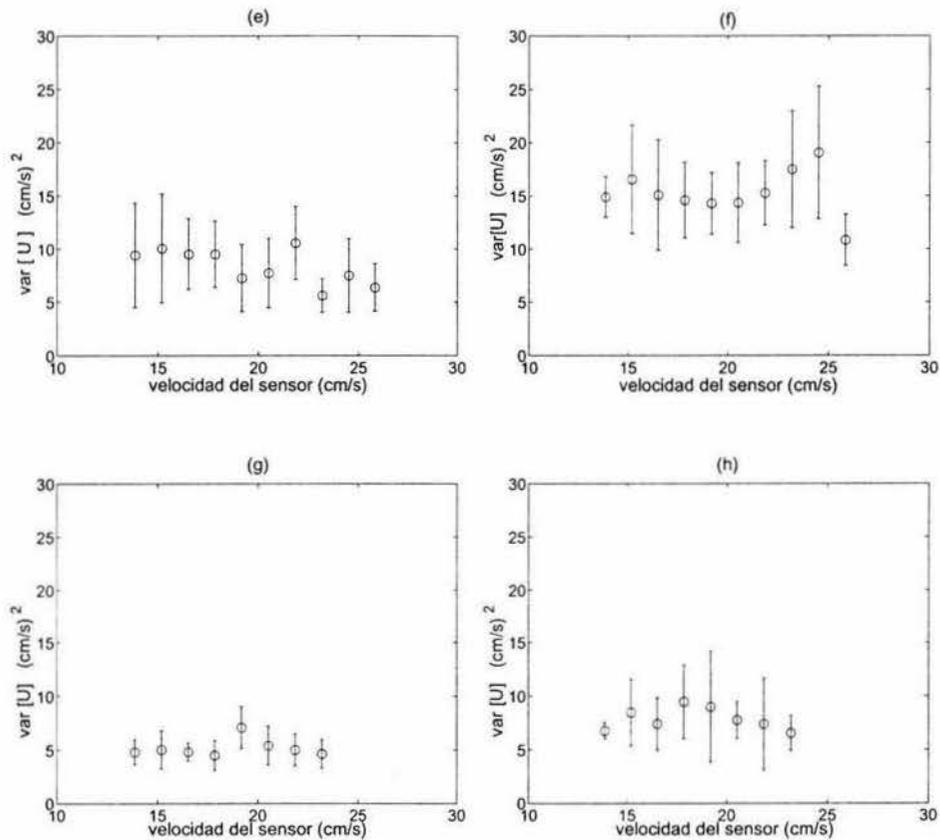


Figura 3.4: Variancia a diferentes velocidades de traslación (continuación): agua-glicerina 30 % (e)  $\alpha = 0.0075$  (f)  $\alpha = 0.0344$ ; agua-glicerina 50 % (g)  $\alpha = 0.011$  (h)  $\alpha = 0.0247$ .

Las gráficas (a) y (b) corresponden a los experimentos realizados con agua. En el caso de  $\alpha = 0.0078$  puede observarse que el valor de la variancia es similar en todas las velocidades de traslación; lo mismo puede decirse de la incertidumbre. Para la fracción volumétrica alta  $\alpha = 0.027$ , el valor de la variancia ha aumentado al igual que la incertidumbre. La variancia es ligeramente mayor para las velocidades de traslación por arriba de 22  $\text{cm/s}$ . Los experimentos con la solución de glicerina al 15 %, gráficas (c) y (d), se llevaron a cabo utilizando las mismas velocidades de traslación que en agua. Observando las gráficas de las dos concentraciones de esta

solución puede determinarse que la variancia conserva su valor en todas las velocidades de traslación, pero se encuentra una gran incertidumbre para las velocidades de traslación altas ( $U_s > 22$  cm/s). Es importante recordar que a medida que se incrementa la velocidad del sensor, la duración de la señal se reduce; en particular cuando el sensor se mueve a 23 cm/s la duración de la señal es aproximadamente 1000 ms; por tanto a velocidades de traslación muy altas la señal es muy corta en tiempo y puede ser poco representativa. Recuérdese además que la señal se reduce aun más al eliminar los intervalos de tiempo en los que ocurre un contacto de burbuja con el sensor.

Para los experimentos con agua-glicerina 30 %, gráficas (e) y (f), se consideró un rango de velocidades más pequeño: 13.8 cm/s a 25.8 cm/s. En ambas fracciones volumétricas,  $\alpha = 0.0075$  y  $\alpha = 0.0344$  se observa que el valor de la variancia, así como su incertidumbre es similar dentro del rango de 16 cm/s a 22 cm/s. Es importante mencionar que las velocidades de traslación muy lentas ( $U_s < 10$  cm/s) generan dos problemas: cuando se tiene un flujo con alta fracción volumétrica es más difícil distinguir el intervalo en tiempo dentro de la señal de voltaje correspondiente a la medición del sensor en movimiento, es decir, se requiere que la velocidad de traslación del sensor sea suficientemente mayor que la componente fluctuante de la velocidad del líquido. De hecho, para lograr que las mediciones sean correctas la calibración del sensor debe realizarse a velocidades similares a las obtenidas en el experimento. Por tanto fue indispensable que el mecanismo lograra velocidades de traslación altas. El segundo problema de las velocidades de traslación bajas surge de la fricción en el mecanismo de traslación. Como es de esperarse, existe fricción entre el portasensor y el orificio de la base del sistema, así como entre el carro y las guías. A velocidades bajas el voltaje de alimentación al motor eléctrico es bajo y no permite inducir un par suficientemente alto para mover todo el mecanismo, provocando que el portasensor se frene en su trayectoria.

Para los experimentos con la solución de glicerina 50 %, gráficas (g) y (h), se escogió el rango de velocidades: 13.8 cm/s a 23 cm/s. Para el caso de  $\alpha = 0.011$ , el valor de variancia así como su incertidumbre es similar en todas las mediciones. Para  $\alpha = 0.0247$  se observa que el valor de la variancia es constante pero la incertidumbre varía con la velocidad de traslación. En particular, para los experimentos de agua-glicerina al 50 % fue imposible obtener fracciones volumétricas por arriba de 0.03. El flujo a esas concentraciones de gas genera una gran cantidad de espuma en la superficie, reduciéndose el nivel de mezcla líquido-burbujas, haciendo incierta la medición de  $\alpha$ .

En resumen se comprobó que existe un rango de velocidades de traslación en el cual la medición de la variancia de las señales de velocidad y su incertidumbre no cambia significativamente. Dicho rango corresponde a 13.8 cm/s a 23.1 cm/s.

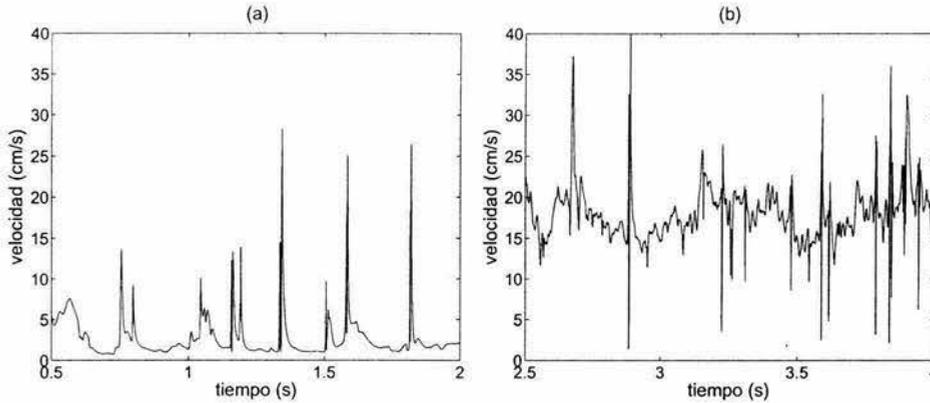


Figura 3.5: Señales de velocidad de agua con  $\alpha = 0.0084$ : (a) sensor en posición estática, (b) sensor en movimiento  $U_s = 17.85$  cm/s.

Dentro de ese rango se hicieron la mayoría de las calibraciones posteriores de película caliente. También se escogió una velocidad única dentro del intervalo para realizar los experimentos y hacer el procesamiento de señales. La mayoría de los resultados a continuación presentados se obtuvieron a una velocidad de traslación de 17.85 cm/s.

Con el fin de mostrar la diferencia entre las mediciones que se obtienen con el sensor estático y el sensor en movimiento, se presentan las señales de velocidad de la figura 3.5. Ambas señales fueron obtenidas a las mismas condiciones de flujo: agua  $\alpha = 0.0084$ . La primera señal de velocidad (a) se obtiene al mantener el sensor en una posición estática. La segunda señal (b) se obtiene al desplazar el sensor a una velocidad constante  $U_s = 17.8$  cm/s. En esta señal no se ha restado el valor de la velocidad de traslación. Las señales son presentadas a la misma escala en tiempo y velocidad. Es importante mencionar que en ambos casos el sensor fue calibrado usando las mismas velocidades de traslación y se tienen las mismas condiciones ambientales. Puede notarse que existen diferencias en la estructura de ambas señales. Como se mencionó anteriormente, el sensor de película caliente estático presenta problemas al medir corrientes inversas las cuales se presentan comúnmente en flujos con características turbulentas. La sonda es sensible principalmente a las velocidades normales a la película cilíndrica (dentro de un plano perpendicular al cilindro); sin embargo, el sistema no puede identificar correctamente la dirección de dichas velocidades. La sonda responde mejor cuando existe una velocidad relativa entre el sensor y el fluido. Es por esto que debe imponerse una velocidad de referencia cono-

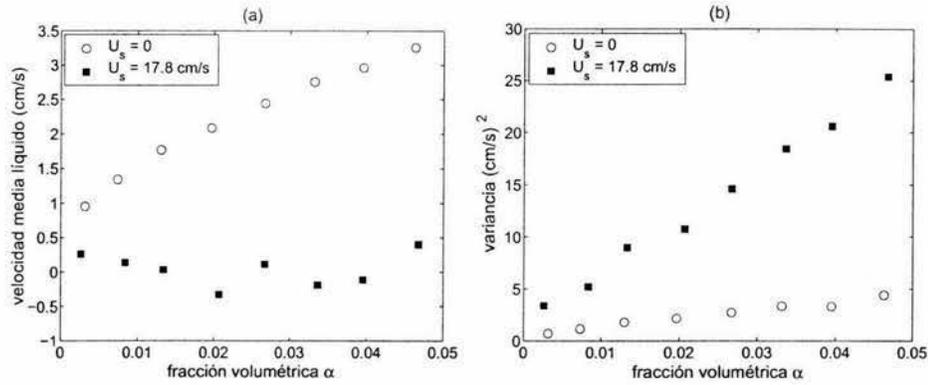


Figura 3.6: Diferencias entre mediciones con el sensor estático y el sensor en movimiento para agua: (a) velocidad media líquido, (b) variancia.

cida. Dicha velocidad debe ser mayor que la componente fluctuante de la velocidad (corrientes inversas). Para obtener mejores resultados, la velocidad de referencia debe estar dentro del rango de calibración del sensor, y las condiciones ambientales (presión, temperatura) entre los experimentos de calibración y los de *campo* deben ser muy similares entre sí. En la mayoría de los casos, se realiza el bombeo de líquido en dirección ascendente o descendente en un canal vertical, para obtener una velocidad media de líquido conocida. En estos casos, el líquido en movimiento presenta fluctuaciones de carácter turbulento originadas por esfuerzos cortantes. La agitación proveniente del movimiento de las burbujas es conocida por algunos autores como pseudo-turbulencia.

En la figura 3.6 se presentan las gráficas de velocidad media de líquido y variancia a diferentes fracciones volumétricas de mediciones con sensor estático y sensor en movimiento. El líquido utilizado es agua. La velocidad media del líquido medida con el sensor estático es una velocidad interpretada erróneamente por el sistema de medición por los motivos mencionados anteriormente. Las mediciones con el sensor en movimiento indican que para el caso de agua la velocidad media es constante a diferentes fracciones volumétricas. La gráfica (b) muestra que la variancia obtenida de las mediciones con el sensor estático es baja comparada con las mediciones del sensor en movimiento. Por tanto se concluye que las señales de velocidad provenientes de mediciones con el sensor estático no muestran una estructura verdadera de la velocidad fluctuante en flujos burbujeantes.

### 3.2. Características de las señales y burbujas

Como se explicó anteriormente, los experimentos se realizaron utilizando cuatro líquidos newtonianos con diferente viscosidad. La fracción volumétrica es controlada con un flujómetro a la entrada del canal. La figura 3.7 muestra fotografías típicas de burbujas presentes en los líquidos usados a diferentes fracciones volumétricas: agua (a)  $\alpha = 0.0026$  (b)  $\alpha = 0.027$  (c)  $\alpha = 0.047$ , agua-glicerina 15 % (d)  $\alpha = 0.0032$  (e)  $\alpha = 0.026$  (f)  $\alpha = 0.050$ , agua-glicerina 30 % (g)  $\alpha = 0.0012$  (h)  $\alpha = 0.025$  (i)  $\alpha = 0.050$  y agua glicerina 50 % (j)  $\alpha = 0.0032$  (k)  $\alpha = 0.010$  (l)  $\alpha = 0.021$ . Todas las fotos corresponden a cuadrados de 3 cm de longitud. A simple vista puede diferenciarse el tamaño y forma de las burbujas para los diferentes líquidos. Las burbujas presentes en agua son en general de forma elíptica. Tomando en cuenta la fracción volumétrica de las mezclas, puede observarse que en el caso de agua, las burbujas aumentan de tamaño y pueden tomar configuraciones amorfas. En las soluciones de glicerina, no hay un cambio evidente en el tamaño de las burbujas, pero sí puede observarse que conforme aumenta la viscosidad de la solución las burbujas adquieren un forma más esférica. Se puede observar que las burbujas son homogéneas en forma y tamaño para las soluciones de glicerina. De las fotos también puede observarse que al aumentar la fracción volumétrica, las burbujas se aglomeran entre sí reduciéndose el espacio de líquido entre ellas. Este fenómeno se incrementa con la viscosidad del líquido provocando que para soluciones con mayor cantidad de glicerina se requiera menos flujo de gas para obtener una misma fracción volumétrica.

En la figura 3.8 se muestra la medición del diámetro equivalente promedio en función de la fracción volumétrica para los diferentes líquidos. El diámetro equivalente se obtuvo mediante un análisis digital de imágenes haciendo uso de un programa en matlab y utilizando la ecuación 1.9. Se midieron 80 burbujas para cada fracción volumétrica en cada líquido. Para el caso de agua se encontró que el diámetro equivalente promedio aumenta conforme se incrementa la fracción volumétrica; sin embargo, puede notarse que la incertidumbre en las mediciones es muy grande. En las fotografías de burbujas en agua puede observarse que la forma de las mismas es irregular para altas fracciones volumétricas. Es importante mencionar que no se tiene una información tridimensional de la forma de las burbujas; por tanto, para estos casos, no se cuenta con una certeza completa en las mediciones del tamaño. Al realizar diferentes experimentos, se observó que cuando se tienen burbujas elípticas la trayectoria de su ascenso es de forma helicoidal. Para agua, el diámetro equivalente varía entre 1.6 mm y 2.4 mm aproximadamente.

Como las burbujas en las soluciones de glicerina se parecen a esferas, y todas son muy similares en tamaño, la incertidumbre en el cálculo de diámetro equivalente disminuye considerablemente. La trayectoria de ascenso de las burbujas esféricas es de forma rectilínea. A diferencia de los resultados de diámetro equivalente de burbu-

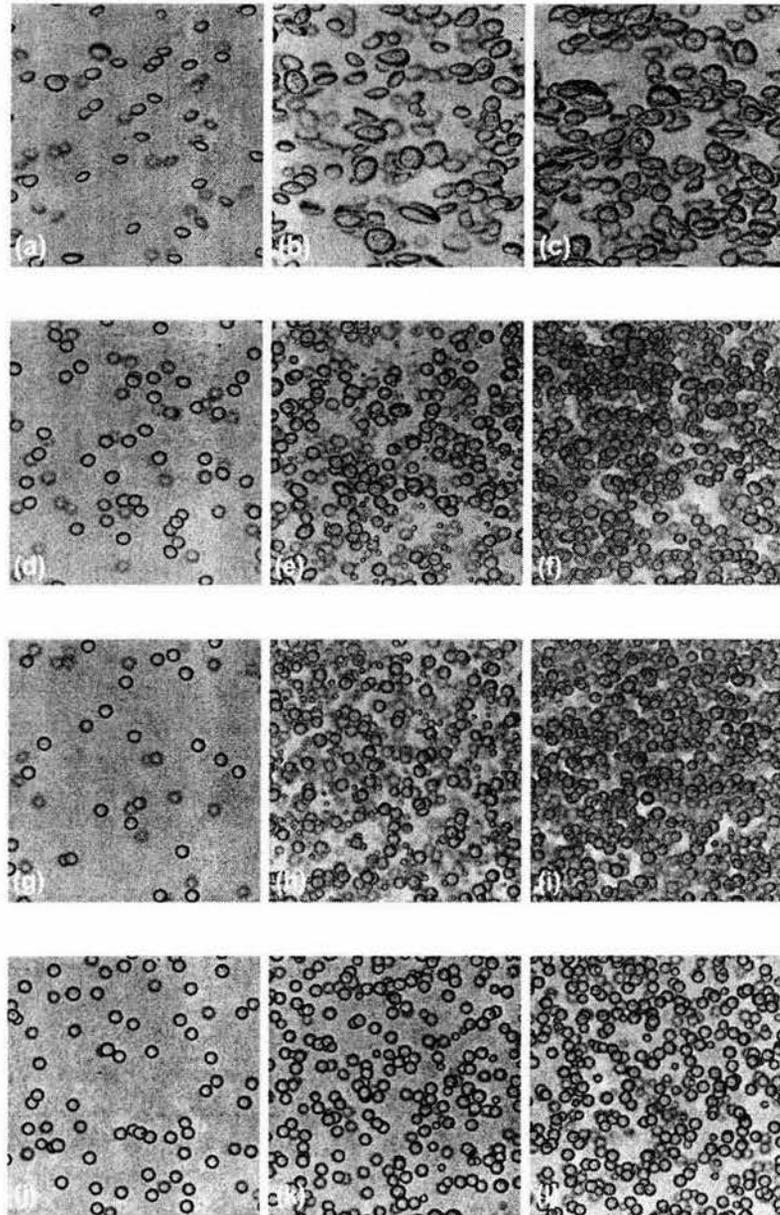


Figura 3.7: Fotos de burbujas: agua (a)  $\alpha = 0.0026$  (b)  $\alpha = 0.027$  (c)  $\alpha = 0.047$ , agua-glicerina 15 % (d)  $\alpha = 0.0032$  (e)  $\alpha = 0.026$  (f)  $\alpha = 0.050$ , agua-glicerina 30 % (g)  $\alpha = 0.0012$  (h)  $\alpha = 0.025$  (i)  $\alpha = 0.050$  y agua-glicerina 50 % (j)  $\alpha = 0.0032$  (k)  $\alpha = 0.010$  (l)  $\alpha = 0.021$ .

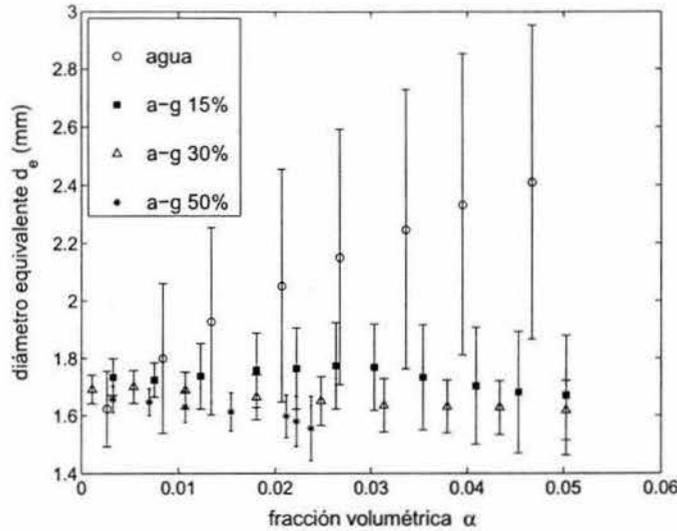


Figura 3.8: Diámetro equivalente a diferentes fracciones volumétricas.

jas en agua, puede observarse que el diámetro para todas las soluciones de glicerina permanece constante a diferentes fracciones volumétricas. El tamaño disminuye ligeramente conforme se aumenta la viscosidad en el líquido. Los diámetros varían entre 1.55 mm y 1.8 mm aproximadamente. El tamaño de las burbujas se determina desde la formación de las mismas en los capilares. En el caso de las burbujas pequeñas, la tensión superficial es lo suficientemente grande para mantenerlas en forma esférica. La forma y tamaño de las burbujas vistas en los experimentos, así como su trayectoria de ascenso, son comparables con estudios del movimiento de una burbuja dentro de un canal realizados por otros autores: Duineveld (1995), Ellingsten y Risso (2001) y Alcaraz (2004).

En la figura 3.9 se muestra la velocidad media de ascenso de burbujas a diferentes fracciones volumétricas para los cuatro líquidos usados. Estos resultados son tomados del trabajo de Martínez (2003) en el cual se midió la velocidad de burbujas mediante el uso de dos puntas de impedancia. Martínez usó el mismo dispositivo experimental que en este trabajo, pero el canal medía 2 m de altura; por esta razón, se pudieron obtener fracciones volumétricas por arriba de 0.05. Sus resultados muestran que en todos los casos la velocidad media de las burbujas disminuye con la concentración de gas. Martínez concluye que las interacciones hidrodinámicas entre burbujas provocan disipación de energía cinética provocando que la velocidad media de las burbujas disminuya. Puede notarse que la velocidad media de las burbujas

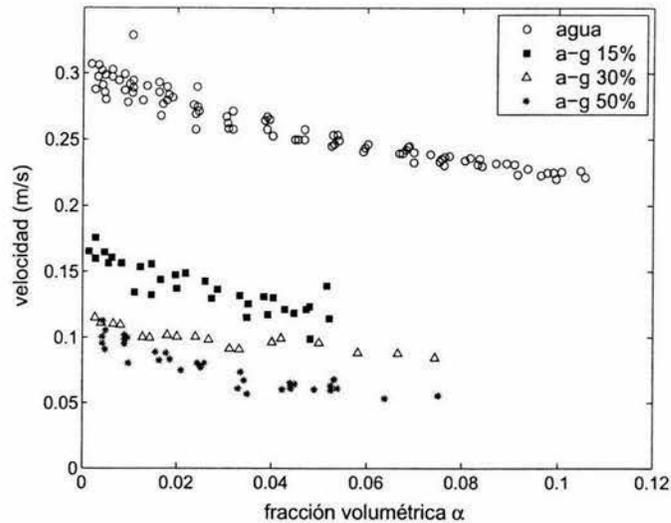


Figura 3.9: Velocidad media de burbujas  $U_B$  a diferentes fracciones volumétricas. Tomado de Martínez (2003).

en agua es considerablemente mayor que en las soluciones de glicerina: aproximadamente el doble que la velocidad media en agua-glicerina 15% para una misma fracción volumétrica. Las velocidades varían entre 22 y 30 cm/s en agua, 11 y 18 cm/s en agua-glicerina 15%, 9 y 11 cm/s en agua-glicerina 30%, 6 y 10 cm/s en agua-glicerina 50%. Martínez también puntualiza que el efecto viscoso en las soluciones afecta la velocidad terminal de las burbujas. A medida que la solución se hace más viscosa, el cambio en la velocidad media es menos notorio. Para  $\alpha$  bajas (0.003) se puede notar que el tamaño de las burbujas es aproximadamente el mismo en todos los líquidos; sin embargo, la velocidad de la burbuja es menor para soluciones más viscosas. Una teoría que explica este fenómeno es que al tener un líquido más viscoso, el número de Reynolds disminuye y el coeficiente de arrastre de un cuerpo esférico inmerso en un flujo es mayor para número de Reynolds bajos. Este aumento de arrastre provocaría la disminución de velocidad. Lo que hace a las burbujas de agua más rápidas que en las soluciones de glicerina puede deberse a la trayectoria ascenso. Las burbujas elípticas presentes en agua se mueven de forma helicoidal disminuyendo el arrastre que se tendría si la mismas se movieran en línea recta.

En las figuras 3.10 y 3.11 se muestran señales de velocidad típicas de líquido incluyendo contactos de burbujas. Estas señales corresponden a los líquidos y frac-

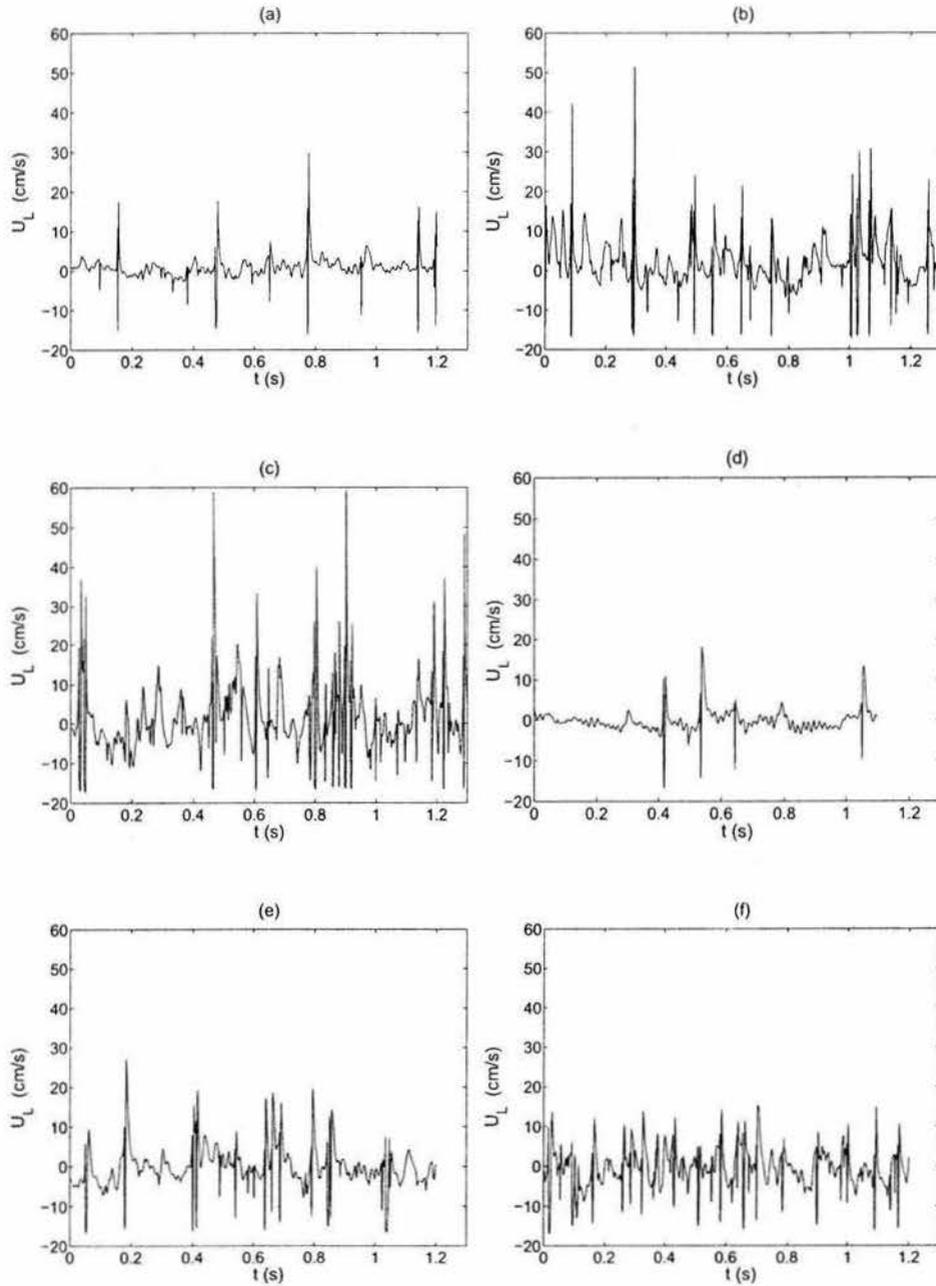


Figura 3.10: Señales de velocidad líquido: agua (a)  $\alpha = 0.0026$  (b)  $\alpha = 0.027$  (c)  $\alpha = 0.047$ , agua-glicerina 15% (d)  $\alpha = 0.0032$  (e)  $\alpha = 0.026$  (f)  $\alpha = 0.050$ .

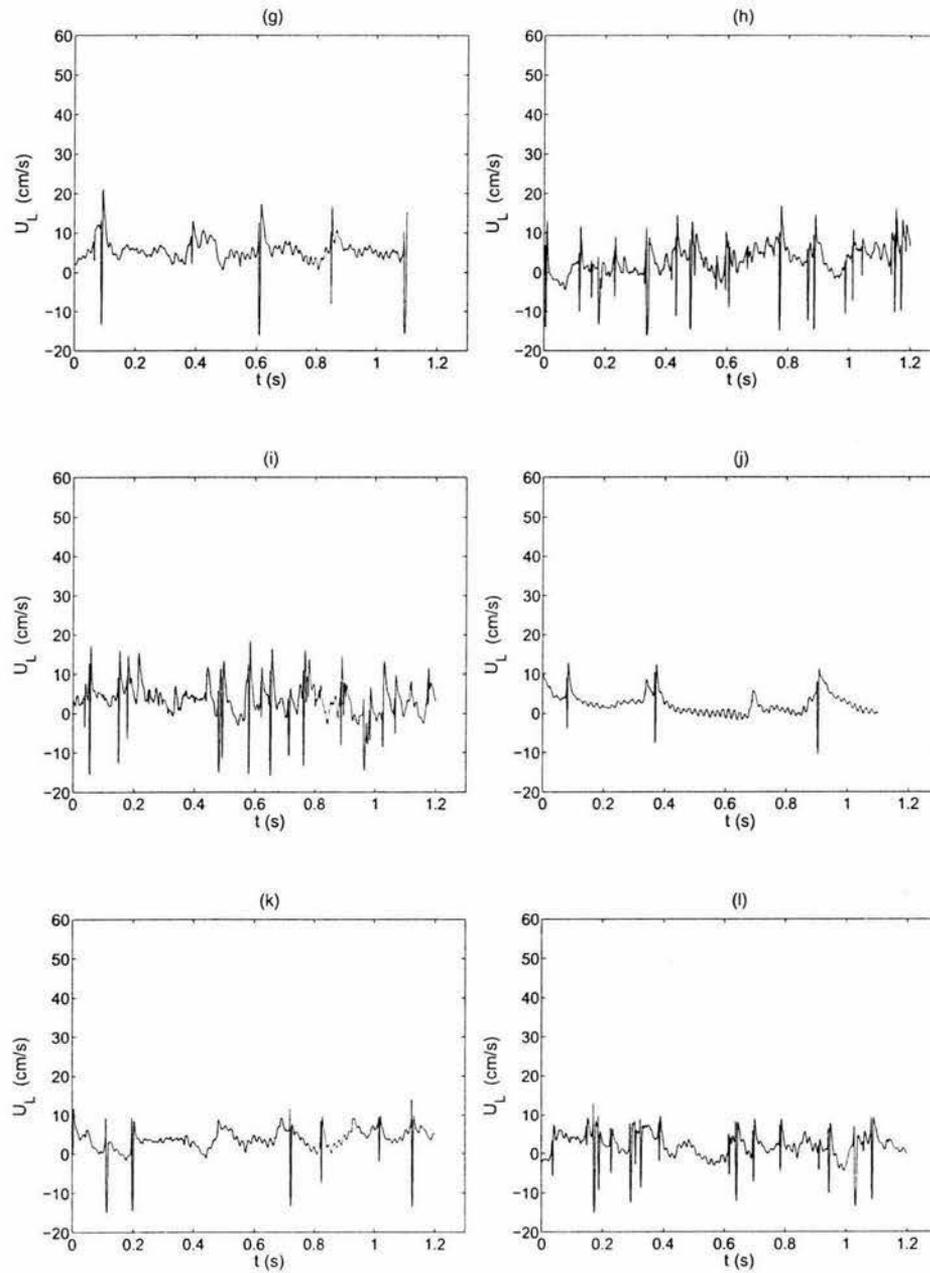


Figura 3.11: Señales de velocidad líquido (continuación): agua-glicerina 30 % (g)  $\alpha = 0.0012$  (h)  $\alpha = 0.025$  (i)  $\alpha = 0.050$  y agua-glicerina 50 % (j)  $\alpha = 0.0032$  (k)  $\alpha = 0.010$  (l)  $\alpha = 0.021$ .

ciones volumétricas de las fotos presentadas en la figura 3.7: agua (a)  $\alpha = 0.0026$  (b)  $\alpha = 0.027$  (c)  $\alpha = 0.047$ , agua-glicerina 15 % (d)  $\alpha = 0.0032$  (e)  $\alpha = 0.026$  (f)  $\alpha = 0.050$ , agua-glicerina 30 % (g)  $\alpha = 0.001079$  (h)  $\alpha = 0.025$  (i)  $\alpha = 0.050$  y agua glicerina 50 % (j)  $\alpha = 0.0032$  (k)  $\alpha = 0.010$  (l)  $\alpha = 0.021$ . Todos los experimentos realizados para obtener estas señales tienen una velocidad de desplazamiento del sensor de 17.85 cm/s. La duración de la señal está entre 1 y 1.2 s aproximadamente. Estas señales incluyen las discontinuidades correspondientes a los choques registrados por el sensor de película caliente. Se puede observar que para agua y agua-glicerina 15 % las señales de velocidad fluctúan alrededor de cero. Para las otras dos soluciones de glicerina, la velocidad media se encuentra en un valor por arriba de cero. En todos los casos puede observarse un incremento en la ocurrencia de contactos de burbujas con el sensor cuando se aumenta la fracción volumétrica. La agitación presente en las señales es mayor al aumentar  $\alpha$ ; en particular, para agua se observa una mayor agitación en el líquido comparada con las otras soluciones. La magnitud y duración de la discontinuidad tiende a disminuir al aumentar la viscosidad de la solución, lo cual está relacionado principalmente a la velocidad de las burbujas y al tiempo de duración de choque. Para una misma señal pueden encontrarse discontinuidades de diferente intensidad; esto está relacionado al *ataque* del sensor contra la burbuja; es decir, contacto total o parcial. En general se pudo constatar que dependiendo del líquido existe una fracción volumétrica, donde se maximiza la ocurrencia de contactos de burbujas-sensor.

En la figura 3.12 se presenta la velocidad media de líquido en la dirección vertical a diferentes fracciones volumétricas para agua y las tres soluciones de glicerina. Cabe destacar que todas las mediciones fueron realizadas a la misma velocidad de traslación del sensor  $U_s = 17.8$  cm/s. Para cada fracción volumétrica se realizaron 10 experimentos. Todas las mediciones de velocidad, correspondientes a un líquido en particular, se realizaron usando la misma calibración y teniendo las mismas condiciones ambientales. En todos los experimentos realizados con agua se observa que la velocidad media es cercana a cero, velocidades entre -1 y 1 cm/s. Los experimentos realizados con agua-glicerina 15 % reportan características similares. Esto indica que el arrastre originado por el movimiento de las burbujas es mínimo en estos dos líquidos. Las velocidades obtenidas para las dos soluciones de glicerina restantes tienen valores arriba de cero. Para agua-glicerina 30 % la velocidad media de líquido tiende a aumentar con la fracción volumétrica. Puede observarse que la incertidumbre de la velocidad medida es mayor que en los otros dos primeros líquidos. Se encuentra un error del 40 % para  $\alpha = 0.025$ . En la solución de glicerina al 50 % la velocidad media se conserva alrededor de 1 y 3 cm. También se presenta una alta incertidumbre en los resultados. El que existan velocidades por arriba de cero indica que existe un arrastre de fase continua debido al movimiento de las burbujas. Como se dijo anteriormente,

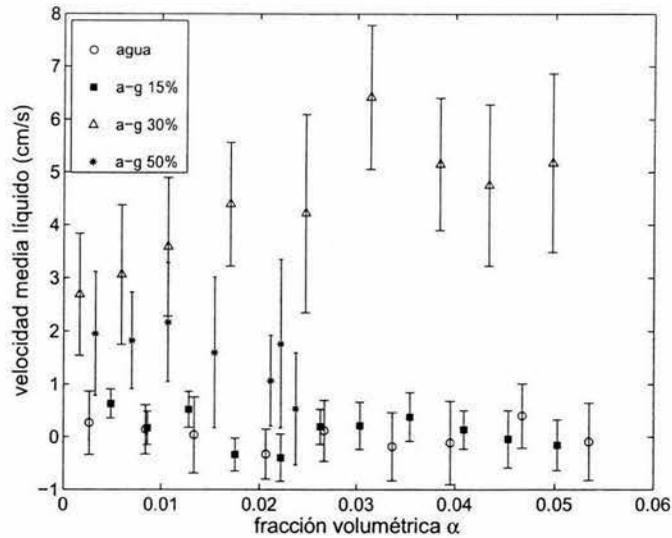


Figura 3.12: Velocidad media de líquido  $\bar{U}$  (dirección vertical) a diferentes fracciones volumétricas.

para líquidos muy viscosos, las burbujas son más esféricas, su ascenso es de forma aproximadamente rectilínea, el número de Reynolds es menor y por lo tanto existe mayor arrastre. Basado en lo anterior, debería encontrarse una velocidad media de líquido mayor para la solución de glicerina al 50%. No existen elementos suficientes para concluir respecto a este punto. Para la solución de glicerina al 50%, los efectos viscosos (número de Reynolds bajo) pueden tomar un papel más importante que los inerciales, evitando que la burbuja pueda desplazarse a mayor velocidad. Otra explicación podría ser la distribución horizontal de velocidades; es decir, el perfil horizontal de velocidades del canal puede no ser simétrico. En este caso, existirían corrientes de líquido más rápidas que asciendan en una dirección distinta a la parte central del canal, por ejemplo, cerca de una pared. Puede decirse que la técnica propuesta es capaz de medir las corrientes locales de líquido originadas por arrastre; sin embargo la técnica sólo mide la velocidad en la parte central del canal. Deben realizarse mediciones de velocidad a diferentes distancias horizontales (plano horizontal) y verificar la característica de los perfiles de velocidad. Estas mediciones pueden realizarse de igual manera con un sensor de película caliente en movimiento pero a diferentes distancias horizontales. Pueden utilizarse varios sensores a la vez para hacer mediciones simultáneas. También pueden usarse otras técnicas como LDV, o bien pueden obtenerse campos de velocidad con PIV.

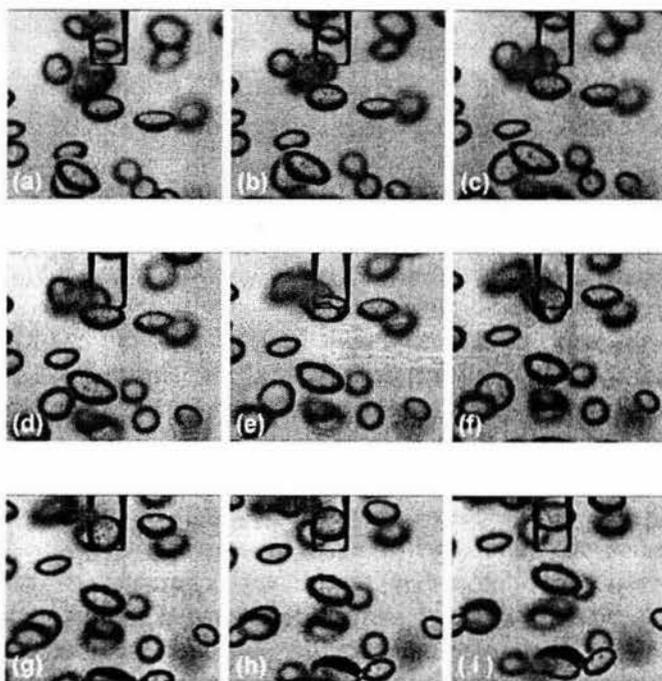
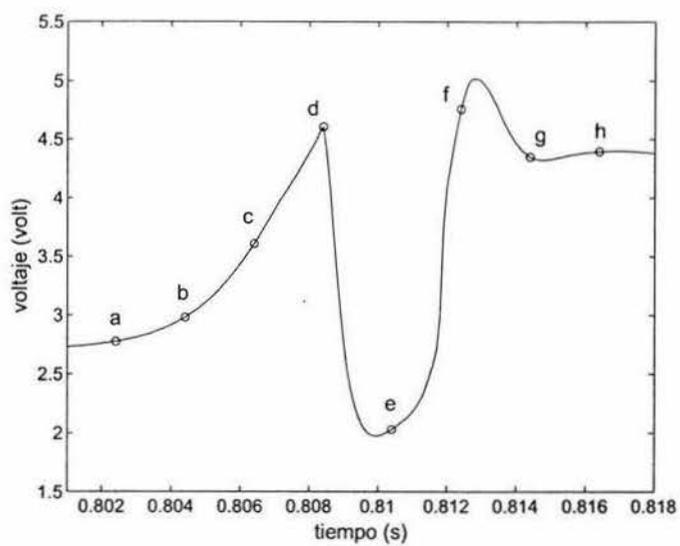


Figura 3.13: Contacto de una burbuja con el sensor.

### 3.2.1. Análisis del choque de una burbuja con el sensor

La figura 3.13 muestra el comportamiento de la señal de voltaje cuando el sensor de película caliente toca a una burbuja. La secuencia de fotos corresponden a los instantes de tiempo en la señal marcados con las letras (*a*) hasta (*i*). La frecuencia de muestreo de la señal es de 10 kHz. La secuencia de fotos se realizó con una cámara rápida a razón de 500 cuadros por segundo; por tanto, el intervalo entre eventos es de 2 ms. Este experimento se realizó con agua a una fracción volumétrica baja ( $\alpha < 0.001$ ) y las mediciones se realizaron con el sensor estático. El contacto en sí, se produce alrededor del instante (*d*) después del cual ocurre una disminución súbita de voltaje en la señal. Este es el momento en que el elemento sensor toca la interface líquido-gas. En la foto correspondiente notamos que el alambre toca la parte posterior de la burbuja elíptica. Antes de que ocurra el contacto (fotos *a-c*) notamos un aumento del voltaje en la señal mostrando la velocidad del líquido en frente de la burbuja aproximándose al sensor. El cambio súbito de voltaje se debe al cambio del medio que rodea al sensor cilíndrico. Al tocar la interface la transferencia de calor entre el sensor y el medio disminuye; es decir, para mantener la temperatura del sensor constante se requiere menor voltaje. En el experimento, las burbujas son muy pequeñas, por tanto en la mayoría de los contactos el sensor no *perfora* a la burbuja. Después del contacto, la burbuja se deforma y después pasa a un lado del sensor siguiendo su camino ascendente. Alrededor del punto (*e*) la burbuja deja de tocar al sensor. De aquí podemos notar que en este choque en particular, así como en la mayoría de los choques presentes en los experimentos, el intervalo de tiempo en el que el sensor toca la interface es de 2 a 3 ms aproximadamente. Al terminar el contacto comienza un aumento del voltaje como producto de una compensación del sensor al tocar exclusivamente líquido. El punto (*g*) es el instante de tiempo donde el efecto de la burbuja sobre el sensor ha terminado y comienza a medir velocidad de líquido. En general la mayoría de los trabajos previos reconocen tres puntos principales de la señal: el punto (*d*) donde comienza el contacto, el punto (*e*) donde la burbuja deja al sensor y el punto de voltaje máximo (entre *f* y *g*) donde termina la compensación de la señal. Referirse a Farrar (1995), Wang (2001), Sun (2002), Gurau (2004) y Rensen (2005).

## 3.3. Agitación de la fase continua

Una vez terminada la validación de las mediciones se procede a realizar el estudio de la agitación del líquido para los diferentes líquidos a diferentes fracciones volumétricas. Todos los experimentos se realizaron usando la misma velocidad de traslación del sensor: 17.85 cm/s. Se tomaron 10 mediciones por cada fracción volumétrica utilizando un sensor *single normal* para la medición de un componente

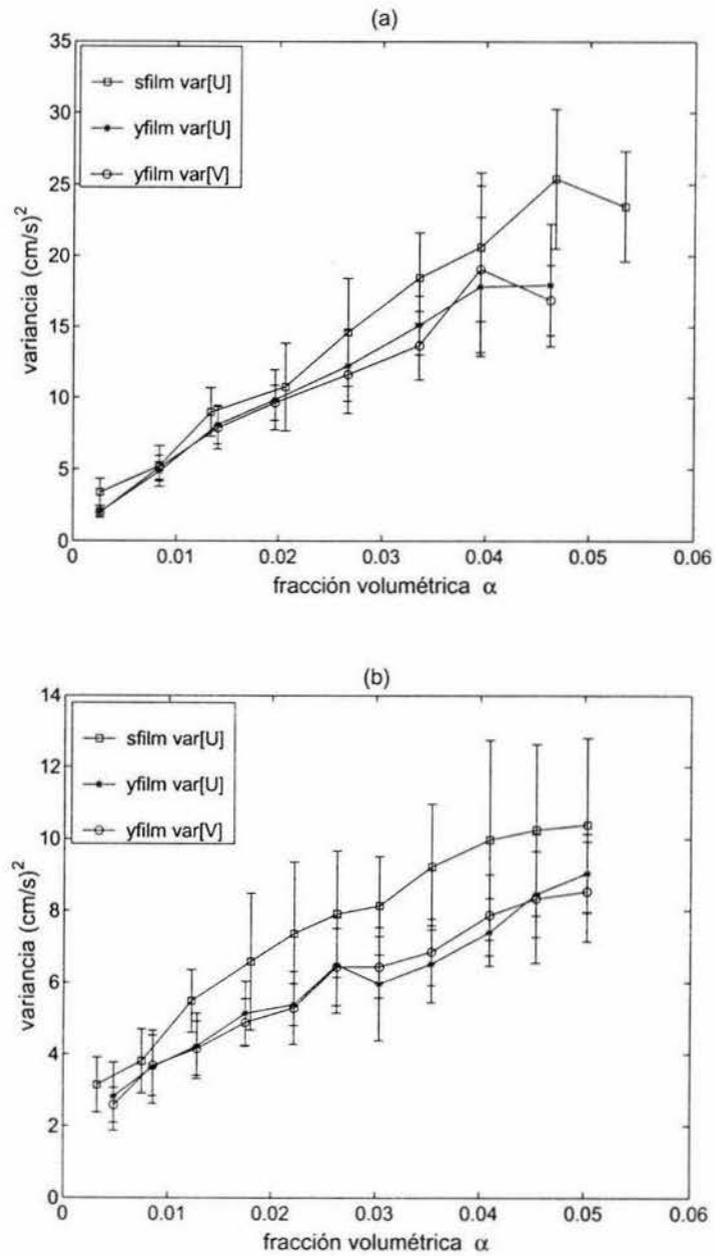


Figura 3.14: Variancia en función de la fracción volumétrica (a) agua (b) agua-glicerina 15%.

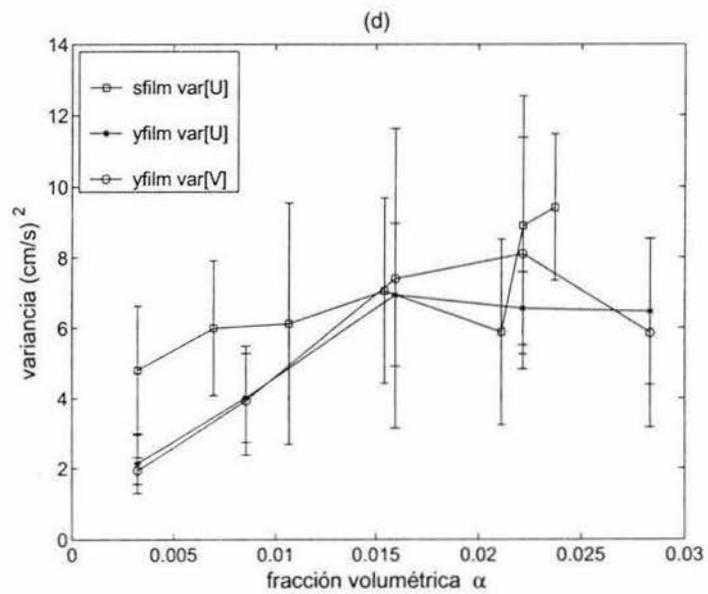
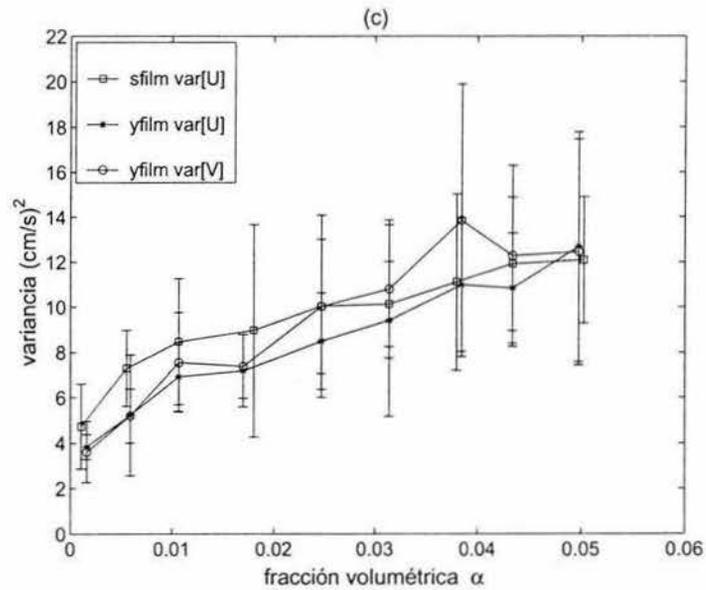


Figura 3.15: (Continuación) Variancia en función de la fracción volumétrica (c) agua-glicerina 30 % (b) agua-glicerina 50 %.

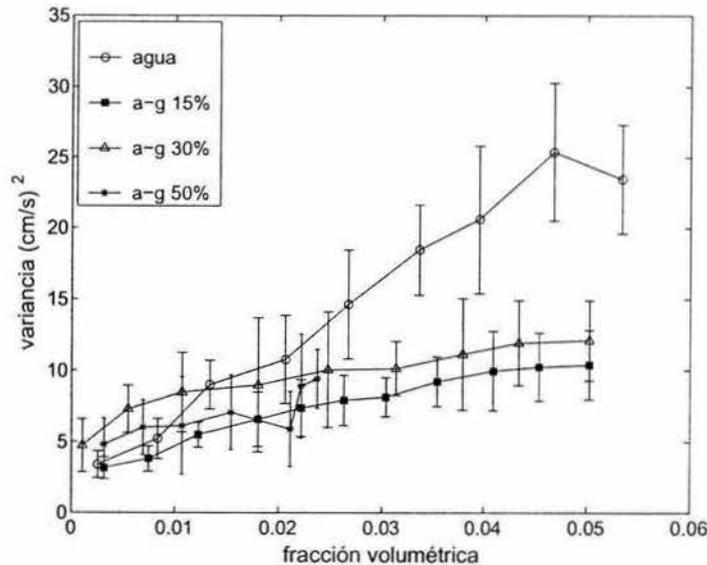


Figura 3.16: Variancia de la velocidad vertical en función de la fracción volumétrica para los diferentes líquidos.

de velocidad y otro sensor *single yawed* para la obtención de dos componentes de velocidad. En las figuras 3.14 y 3.15 se muestran las gráficas de variancia en función de la fracción volumétrica para los diferentes líquidos (a) agua (b) agua-glicerina 15 % (c) agua-glicerina 30 % y (d) agua-glicerina 50 %.

En el caso de agua, gráfica (a), se observa que la tendencia en las tres mediciones obtenidas es de un aumento en el valor de la variancia conforme se incrementa la fracción volumétrica. Para  $\alpha > 0.02$ , puede notarse que los valores de variancia de la velocidad vertical en las mediciones con el sensor *single normal* son ligeramente mayores que los resultados obtenidos con el sensor *single yawed*. La diferencia es de 18 % para  $\alpha = 0.034$ . Los valores  $var[U]$  y  $var[V]$  tomados con el sensor *SY* son muy similares entre sí. Así mismo se observa que la variabilidad de la variancia aumenta con la fracción volumétrica. Los resultados para el caso de agua-glicerina 15 %, gráfica (b), son similares a los de agua. Se observa que el valor de la variancia medida con el sensor *SN* es significativamente mayor que las otras dos mediciones. Para  $\alpha = 0.035$  se tiene una diferencia de 28 %. Nuevamente, encontramos una similitud estadística entre la velocidad vertical y horizontal medidos con el sensor inclinado *SY*.

No se puede explicar con total certeza por qué en agua y en la solución de

glicerina al 15% existe una diferencia en el valor de la variancia medida por los dos sensores. Es interesante observar que este problema se presenta en los líquidos donde la velocidad media de fase continua es cero. Aunque existe velocidad vertical impuesta al sensor, no existe una velocidad relativa en la dirección horizontal. Esto podría alterar la estructura real de la señal de velocidad haciendo las mediciones ambiguas. En las soluciones de glicerina más viscosas el problema puede disminuir debido a que sí existen corrientes locales de líquido.

Los resultados obtenidos para la solución de glicerina al 30%, gráfica (c), muestran que el valor de la variancia es similar utilizando los dos tipos de sensores. La variancia aumenta con la fracción volumétrica. Los resultados obtenidos para la solución de glicerina 50%, gráfica (d), también indican un aumento de variancia con la fracción volumétrica pero se observa gran incertidumbre en los resultados. Se observa que los valores  $var[U]$  y  $var[V]$  tomados con el sensor *yawed film* son muy similares entre sí. Es importante mencionar que el sensor inclinado *SY* debe girarse  $180^\circ$  sobre su eje en dos posiciones, por tanto las mediciones de las velocidades equivalentes  $U_{e1}$  y  $U_{e2}$  no se realizan simultáneamente.

En la figura 3.16 se muestra la variancia de la velocidad en dirección vertical para todos los líquidos. Puede notarse que para fracciones volumétricas mayores a 0.01, la variancia es mayor en agua, es decir, la agitación de la fase continua para este líquido es mayor. Esto indica que el movimiento helicoidal de las burbujas presentes en el líquido provocan más agitación que las burbujas esféricas. Para las distintas soluciones de glicerina puede observarse que la agitación es similar conforme se aumenta la fracción volumétrica. La variancia es ligeramente mayor en agua-glicerina 30%. Se esperaría un valor de variancia mayor para la solución de glicerina al 15% ya que el movimiento en forma helicoidal de las burbujas en este líquido provocarían mayor agitación que en la solución al 30% en donde las burbujas tienen un movimiento más rectilíneo. Sin embargo, se comprobó que para la solución de glicerina al 30% existe movimiento de líquido debido al arrastre, lo cual añade una componente turbulenta a las señales de velocidad. Los resultados obtenidos para glicerina 50% cuando  $\alpha > 0.02$  presentan muchos problemas ya que, como se explicó anteriormente, se forma espuma en la superficie haciendo difícil la estimación de la fracción volumétrica.

La figura 3.17 muestra la agitación de la fase continua para los diferentes líquidos tomando en cuenta la variancia media en la dirección vertical. En el eje de las abscisas se tiene la fracción volumétrica y en el eje de las ordenadas la variancia dividida entre la velocidad media de las burbuja elevada al cuadrado. Las velocidades medias de burbujas se tomaron del trabajo realizado por Martínez (ver figura 3.9). La línea punteada muestra la predicción según la ecuación 1.16. Este modelo, sin embargo, considera la forma de la burbuja esférica, pero como se demuestra en los

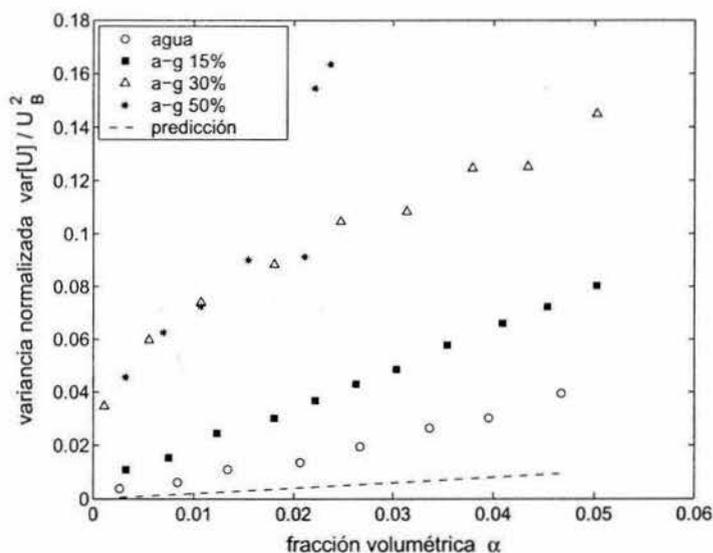


Figura 3.17: Variancia normalizada en función de la fracción volumétrica para los diferentes líquidos.

resultados la forma elíptica de las burbujas induce mayor agitación en el líquido. Además la predicción no considera las interacciones entre burbujas que es un factor determinante en los flujos con alta fracción volumétrica. En general para todos los casos se observa que la agitación del líquido se incrementa casi de manera lineal al aumentar la fracción volumétrica debido a la presencia de las burbujas. El valor de la variancia normalizada para la misma fracción volumétrica es mayor al aumentar la viscosidad del líquido excepto para la solución de glicerina al 50%.

En la figura 3.18 se presenta la variancia normalizada como función del número de Reynolds  $Re = \rho_f U_B d_e / \mu_f$ , donde  $\rho_f$ ,  $U_B$ ,  $d_e$ ,  $\mu_f$  son la densidad del líquido, velocidad media de las burbujas, diámetro equivalente y viscosidad del líquido, respectivamente. Entre más viscoso es un líquido el número de Reynolds es menor. En los casos de soluciones de glicerina se nota que la variancia normalizada disminuye con el número de Reynolds, pero en agua sucede lo opuesto. En el caso de las soluciones con glicerina el valor de número de Reynolds depende principalmente de la velocidad media de las burbujas. De acuerdo con los resultados reportados por Martínez, la velocidad media de burbujas disminuye al aumentar la fracción volumétrica; por tanto, el número de Reynolds también disminuye. En agua, la velocidad media de burbujas también disminuye con la concentración de gas, pero en

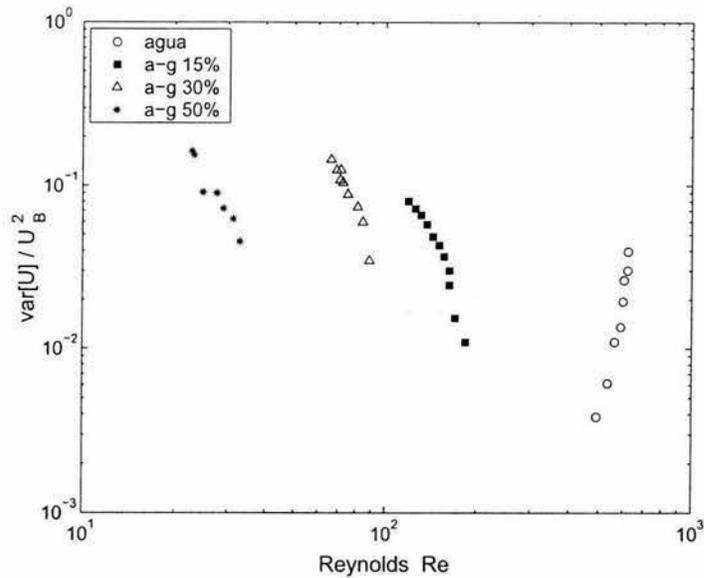


Figura 3.18: Variancia normalizada en función del número de Reynolds para los diferentes líquidos.

este caso, el diámetro equivalente de la burbuja se incrementa considerablemente con la fracción volumétrica. Este aumento de diámetro provoca que el número de Reynolds sea mayor con la fracción volumétrica invirtiendo la tendencia de la curva tal como se ve en la figura 3.18.

Finalmente, en la figura 3.19 se muestra una gráfica donde se presenta la variancia normalizada en función de  $\alpha/Re$ . Los símbolos rellenos muestran los resultados obtenidos en el presente trabajo. Los símbolos vacíos muestran resultados obtenidos previamente. Los resultados obtenidos por Faeth (1990,1992) y colaboradores presentados en la gráfica se realizaron utilizando flujos con partículas sólidas y bajas fracciones volumétricas. Lance (1986) realizó experimentos con burbujas elipsoidales con números de Reynolds de aproximadamente 600 y fracciones volumétricas menores a 0.016. Los resultados presentados por Cartellier (2001) se obtuvieron con experimentos de flujos burbujeantes a  $Re=O(1)$  y  $Re=O(10)$ . Puede observarse que los resultados obtenidos para la agitación del líquido tienen una tendencia muy similar a los resultados de Cartellier. Dicha tendencia se pueda aproximar con una línea recta de pendiente  $2/3$  en escala logarítmica. Por tanto se encuentra que  $\text{var}[U]/U_B^2 = f(\alpha/Re)^{2/3}$ .

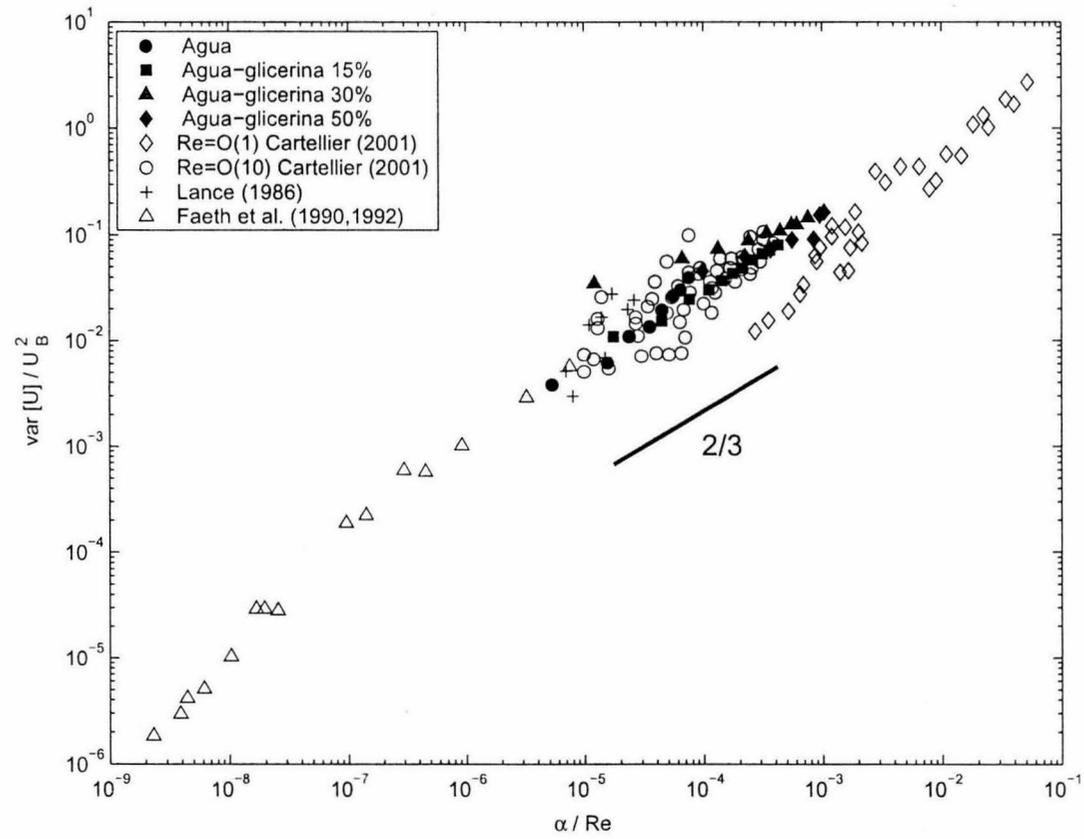


Figura 3.19: Variancia normalizada en función de  $\alpha/Re$ ; resultados obtenidos previamente para varios flujos bifásicos. Tomado de Cartellier y Rivière (2001).

## Capítulo 4

# Conclusiones

Se estudió la agitación de la fase líquida de una suspensión monodispersa de burbujas ascendiendo en un canal vertical. Se obtuvieron mediciones de velocidad fluctuante de líquido a través de la técnica de anemometría de película caliente. Se utilizaron cuatro líquidos diferentes: agua, agua glicerina al 15, 30 y 50 por ciento en peso. Los experimentos se realizaron a diferentes fracciones volumétricas de  $\alpha = 0.001$  hasta  $\alpha = 0.05$  aproximadamente. Se midieron los diámetros equivalentes de las burbujas para los diferentes líquidos. El número de Reynolds varió entre 490-620 para agua, 120-180 en agua-glicerina 15 %, 66-88 en agua-glicerina 30 % y 22-32 en agua-glicerina al 50 %.

Se encontró que en el caso de agua, la forma de las burbujas es elipsoidal a bajas concentraciones de gas e irregular a altas concentraciones. El diámetro equivalente de las burbujas aumenta con la fracción volumétrica y se observa que la trayectoria de ascenso es de forma helicoidal. Los diámetros equivalentes varían entre 1.6 y 2.4 mm. En las soluciones de agua-glicerina se observan burbujas más pequeñas y el tamaño se conserva casi constante con la fracción volumétrica. El diámetro de la burbuja disminuye ligeramente al aumentar la viscosidad de la solución. Las burbujas más pequeñas presentan una forma más esférica y su trayectoria ascendente es casi rectilínea. Las soluciones de agua-glicerina al 15 y 30 % presentan diámetros de burbujas entre 1.6 y 1.8 mm. Las burbujas en agua-glicerina al 50 % miden cerca de 1.5 mm para las mayores fracciones volumétricas.

Se realizaron mediciones de velocidad de líquido a diferentes velocidades de traslación del sensor y se comprobó que, dentro de un intervalo, la medición de la velocidad fluctuante de líquido no depende de la velocidad de traslación del sensor; así mismo se obtuvieron espectros de potencia para comprobar que el ruido propio de las señales no afecta las mediciones. Se calculó la variancia de la señal de velocidad como medida de la agitación presente en el líquido. Con relación a la velocidad

vertical media del líquido se comprueba que su valor fluctúa alrededor de cero para agua y glicerina al 15 %. La velocidad vertical media se encuentra por arriba de cero para las soluciones de glicerina al 30 % y 50 %. Esto indica que para líquidos viscosos, existe arrastre de líquido como producto del movimiento de las burbujas. La ocurrencia de contactos de burbujas con el sensor aumenta con la fracción volumétrica tal como se espera. En todos los líquidos se comprueba que la agitación de la fase continua aumenta con la fracción volumétrica. En el caso de agua se observa que la naturaleza oscilante de la trayectoria de las burbujas elipsoidales inducen mayor agitación en el líquido. Para fracciones volumétricas pequeñas ( $\alpha < 0.01$ ), la magnitud de la variancia es la misma para los cuatro líquidos. En la solución de glicerina al 30 % es ligeramente mayor debido al desplazamiento de líquido por arrastre. Haciendo uso de un sensor de película caliente inclinado se realizaron mediciones de dos componentes de velocidad. No se encontró una diferencia notable en los resultados de agitación en la dirección vertical y horizontal.

Utilizando una cámara rápida se tomaron secuencias de fotos de una burbuja tocando al elemento sensor. Las fotos se compararon con la señal generada por el sensor de película caliente. En general, se observó que los contactos encontrados y eliminados de la señal de velocidad corresponden a eventos en los que el sensor toca por un intervalo de tiempo la interface líquido-gas, pero éste no perfora a la burbuja. Esto sucede normalmente cuando el diámetro de las burbujas es pequeño.

En la gráfica de variancia normalizada (variancia dividida entre el cuadrado de la velocidad media de las burbujas) en función de la fracción volumétrica, se encontró una tendencia lineal en el incremento de la agitación para todos los líquidos. En el caso de agua se encontró un aumento de la variancia normalizada con el número de Reynolds. En las soluciones de glicerina se observa lo opuesto. Esto se debe principalmente a que el tamaño de las burbujas en agua se incrementa considerablemente con la fracción volumétrica. Finalmente, se presentaron los resultados de variancia normalizada en función de  $\alpha/Re$  y se compararon con resultados obtenidos en investigaciones previas para distintos experimentos con flujos bifásicos. Se encontró una buena concordancia con los resultados presentados por Cartellier para experimentos con flujos burbujeantes con  $Re=O(10)$ . Se concluye que con la técnica propuesta se obtienen datos confiables de velocidad de líquido y los resultados de agitación son comparables con los reportados en la literatura.

# Bibliografía

- [1] Alcaraz, R. (2004). Movimiento de una burbuja de gas en un líquido. Tesis de licenciatura. U.N.A.M. México.
- [2] Brunn, H. (1995). *Hot-Wire Anemometry, Principles and Signal Analysis*. Oxford University Press.
- [3] Bunner, B. y Tryggvason G. (2002). Dynamics of homogeneous bubbly flows Part 2. Velocity fluctuations. *J. Fluid Mech.* **466** 53-84.
- [4] Cartellier, A. y Riviere, N. (2001). Bubble-induced agitation and microstructure in uniform bubbly flows at small to moderate particle Reynolds numbers. *Physics of fluids*. **13**, 2165-2181.
- [5] Chahed, J., Roig V. y Masbernat, L. (2003). Eulerian-Eulerian two-fluid model for turbulent gas-liquid bubbly flows. *Intl J. Multiphase Flow*. **29**, 23-49.
- [6] Clift, R., Grace, J. and Weber M. (1978). *Bubbles, Drops, and Particles*. Academic Press.
- [7] Cole, D.R. y Glauser M.N. (1998). Flying hot-wire measurements in an axisymmetric sudden expansion. *Experimental thermal and fluid science*. **18**, 150-167.
- [8] Crowe, C. y Sommerfield. M. (1998). *Multiphase flows with droplets and particles*. CRC Press.
- [9] Duiniveld, P.C. (1995). The rise and shape of bubbles in pure water at high Reynolds number. *J. Fluid Mech.* **292**, 325-332.
- [10] Ellingsen, K. y Risso F. (2001). On the rise of an ellipsoidal bubble in water: oscillatory paths and liquid-induced velocity. *J. Fluid Mech.* **440**, 235-268.
- [11] Farrar, B. y Bruun. H.H. (1989). Interaction effects between a cylindrical hot-film anemometer probe and bubbles in air/water and oil/water flows. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **22**. 114-123.

- [12] Farrar, B., Samways, A.L., Ali, J. y Brunn, H.H. (1995). A computer-based hot-film technique for two-phase flow measurements. *Meas. Sci. Technol.* **6**, 1528-1537.
- [13] Gurau, B., Vasallo P. y Keller K. (2004). Measurement of gas and liquid velocities in an air-water two-phase flow using cross-correlation of signals from a double sensor hot-film probe. *Experimental Thermal and Fluid Sciencie.* **28**, 495-504.
- [14] Hah, C. y Lakshminarayana, B. (1978). Effect of rotation on a rotating hot-wire sensor. *J. Phys. E. Sci. Instr.* **11**, 999-1001.
- [15] Jones, O. y Zuber N. (1975). The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow. *Intl J. Multiphase Flow.* **2**, 273-306.
- [16] Lance, M. (1986). Étude de la turbulence dans les écoulements diphasiques dispersés. These d'État, Lyon, France.
- [17] Lance, M. y Bataille, J. (1991). Turbulence in the liquid phase of a uniform bubbly air-water flow. *J. Fluid Mech.* **222**, 95-118.
- [18] Lessard, R.R. y Zieminski, S.A. (1971). Bubble coalescence and gas transfer in electrolytic aqueous solutions. *Ind. Engng. Chem. Fundam.* **10**, 260-269.
- [19] Martínez J. (2003). Reología de flujos burbujeantes. Tesis de licenciatura, U.N.A.M., México.
- [20] Payne, F.R. y Lumley, J.L. (1966). One-dimensional spectra derived from an airborne hot-wire anemometer. *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **92**, 397-401.
- [21] Perry, A.E. (1982). *Hot-wire Anemometry*. Clarendon Press, Oxford.
- [22] Rensen, J., Luther S., de Vries J y Lohse D. (2005). Hot-film anemometry in bubbly flow I: bubble-probe interaction. *Intl J. Multiphase Flow.* **31**, 285-301.
- [23] Risso, F. y Ellingsen, K. (2002). Velocity fluctuations in a homogeneous dilute dispersion of high-Reynolds-number rising bubbles. *J. Fluid Mech.* **453**, 395-410.
- [24] Serizawa, A., Kataoka, I. y Michiyoshi. I. (1975). Turbulence structure of air-water bubbly flow. III. Transport properties. *Intl J. Multiphase Flow.* **2**, 247-259.
- [25] Sun, X., Kim, S., Smith, T.R. y Ishii M. (2002). Local liquid velocity measurements in air-water bubbly flow. *Experiments in Fluids.* **33**, 653-662.

- [26] Theofanous, T.G. and Sullivan, J.P. (1982). Turbulence in two-phase dispersed flows. *J. Fluid Mech.* **116**, 343-362.
- [27] Vasallo, P.F. y Kumar, R. (1999). Liquid and gas velocity measurements using LDV in air-water duct flow. *Experimental Thermal and Fluid Science* **19**, 85-92.
- [28] Wang, G. y Ching, C.Y. (2001). Measurement of multiple gas-bubble velocities in gas-liquid flows using hot-film anemometry. *Experiments in Fluids*. **31**, 428-439.
- [29] Zenit, R., Koch, D.L. y Sangani, A.S. (2001). Measurements of the average properties of a suspension of bubbles rising in a vertical channel. *J. Fluid Mech.* **429**, 307-342.
- [30] Wijngaarden, L. van (1976). Hydrodynamic interaction between gas bubbles in liquid. *J. Fluid Mech.* **77**, 27-44.
- [31] Wijngaarden, L. van (1998). On Pseudo Turbulence. *Theoret. Comput. Fluid Dynamics* **10**, 449-458.



# Apéndice A

## Programas de Matlab

### Calculo de media y variancia de una señal

```
% Programa para determinar los puntos de avance y retroceso para eliminar  
% los choques de la señal. El programa calcula la media y variancia de un  
% archivo de señal. una componente de velocidad
```

```
%Ecuacion calibracion  $E^2 = A + B U^n$ 
```

```
time=cputime
```

```
%aumento de voltaje a todos los datos para evitar voltajes negativos  
aувolt=4;
```

```
% puntos de avance y retroceso señal cortada  
% pret = puntos de retroceso (fijo)  
% pavl = punto de avance
```

```
vfuente=29;
```

```
pret=50; pavl=200; umbral=0.75;
```

```
puntos=pavl; %puntos de retardo
```

```
carpeta='seriesenal\aguapura';
```

```
archivo='lim50ap.txt'; fvol=50;
```

```
coefa=-5.9077; coefb=10.6288;
```

```
exp=7;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

%carpeta=input('Nombre de la carpeta de los archivos de burbujas: ','s');
%archivo=input('Nombre del archivo de limites de burbujas: ','s');

alim=['c:\hilo\resultados\' carpeta '\' archivo];
ruta=['c:\hilo\datos\' carpeta '\']; data=load(alim);
ind_arch=data(:,1);

[reng,colum]=size(data);

veces=(colum-1)/2; li=data(:,2:veces+1); ls=data(:,veces+2:colum);

%fvol=input('Fraccion volumetrica de los archivos a procesar: ');
%coefa=input('coeficiente A de la curva de ajuste: ');
%coefb=input('coeficiente B de la curva de ajuste: ');

%vfuelle=input('Voltaje de fuente de los archivos a procesar: (ej. 11, 17, 35) ');
%exp=input('numero de experimento de ese voltaje fuente: (1 a 5) ');

for m=1:reng
    if vfuelle==ind_arch(m)
        narch=m;
    end
end

%DEFINICIONES
%velt = velocidad de traslacion de la punta
%vel = velocidad de la se&al

%velocidades en mm/s medidos.
load('voct23.txt'); velt=voct23/10; ind_vel=7:2:49;

for n=1:length(ind_vel)
    if vfuelle==ind_vel(n)
        velo=velt(n);
    end
end

tt=0;
arch1=[ruta 'B' num2str(fvol) 'F' num2str(vfuelle) '.B000' num2str(exp) ];
load(arch1);
archu=eval(['B' num2str(fvol) 'F' num2str(vfuelle)]);
tiempo=archu(:,1);

volt=archu(:,2)+auvolt;

%GRAFICA SE&AL COMPLETA VOLTAJE-TIEMPO

figure(1)
clf
plot(tiempo,volt,'b-')

```

```

xlabel('tiempo (s)')
ylabel('voltaje (volt)')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % Se%al completa
%
for i=1:length(tiempo)

    velsp(i)=(((volt(i).^2)-coefa)/coefb)^3;
end

figure(2)
plot(tiempo,velsp,'b-')
xlabel('tiempo (s)')
ylabel('velocidad (cm/s)')
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

vp=volt(li(narch,exp):ls(narch,exp));
t=0:0.0001:(length(vp)-1)/10000;
L=length(t);

for i=1:L

    vel(i,1)=(((vp(i,1).^2)-coefa)/coefb)^3-velo;
    %conversion de voltaje a velocidad

end

media_sevel=mean(vel)

%VELOCIDAD vs TIEMPO (SEAL CORTADA)

figure(3)
clf
plot(t,vel,'k-')
xlabel('tiempo (s)')
ylabel('velocidad liquido (cm/s)')
% title('a')
axis([0 1.3 -20 60])

%DIFERENCIAL DE LA SEAL DE VELOCIDAD
dve=diff(vel);
dve2=diff(vel)/0.0001;

t2a=(L-2)/10000;
t2b=0:0.0001:t2a;
t2c=transpose(t2b);

figure(4)
clf
plot(t2c,dve2,'r-')

k=1;

```

```

indice=zeros(1,2);
band=1;
d=1;

for a=1:L-1
    if abs(dve(a))>umbral & band==1
        indice(k,1)=a-pret;
        indice(k,2)=a+puntos;
        k=k+1;
        band=0;
        d=0;
        tt=1;
    end
    if band==0
        d=d+1;
    end
    if d==puntos
        band=1;
    end
end

if tt==1
[ren,col]=size(indice);
vt=transpose(vel);
vsb=vt(1:indice(1,1));

%juntando los tramos no recortados de la senial
for j=1:ren-1
    vsb=cat(2,vsb,vt(indice(j,2):indice(j+1,1)));
end
vsb=cat(2,vsb,vt(indice(ren,2):length(vt)));

%VELOCIDAD vs T SIN CHOQUES

tiempo5=1:length(vsb);
tiempo5b=tiempo5/10000;

end%del if tt==1

if tt==0;

tiempo5b=transpose(t);
vsb=vel;

end

figure(5)
clf
plot(tiempo5b,vsb,'b-')
xlabel('tiempo (s)')
ylabel('velocidad (cm/s)')
axis([0 1.3 -20 30])

% calculo de variancia y media
media_sevelfinal=mean(vsb)
variancia=var(vsb)

```

```

porsenalper=(1-(length(tiempo5b)/length(t)))*100

cputime-time

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Calibración del sensor

clear all

%Programa para calcular coeficientes A y B de la curva de calibracion
%En este caso la forma de la ecuacion de calibracion es
%  $E^2 = A + B U^n$  diferente a curvavolvel

%aumento de voltaje a todos los datos para evitar voltajes negativos
auvolt=4;

carpeta=input('Nombre de la carpeta de los archivos de calibracion:
','s'); archivo=input('Nombre del archivo de limites: ','s');
calib=upper(input('prefijo de los archivos de calibracion (CAL,
CALB, CALC, etc) ','s')); alim=['c:\hilo\resultados\' carpeta '\'
archivo]; ruta=['c:\hilo\datos\' carpeta '\']; data=load(alim);
ind_arch=data(:,1);

[reng,colum]=size(data); veces=(colum-1)/2; li=data(:,2:veces+1);
ls=data(:,veces+2:colum);

volt_m=zeros(reng,2);

for narch=1:reng
    volt_m(narch,1)=ind_arch(narch);
    for c=1:veces
        arch1=[ruta calib num2str(ind_arch(narch)) '.B000' num2str(c) ];
        load(arch1);
        archu=eval(['calib num2str(ind_arch(narch))']);
        vp=archu(:,2)+auvolt;
        %vp=archu(:,3)+auvolt;      % para sonda de dos hilos

        vrepr=vp(li(narch,c):ls(narch,c));
        volt_m(narch,c+1)=mean(vrepr);
        clear vrepr;
    end
    voltaje(narch)=mean(volt_m(narch,2:veces+1));
end

%velocidades en mm/s medidos.
load('voct23.txt'); vel=voct23/10;
%vel=(voct23*sin(pi/4))/10;

```

```

% Para dos componentes de velocidad sensor a 45 grados
ind_vel=7:2:49; k=1; tope=0; for m=1:length(ind_vel)
    if tope==0
        if ind_vel(m)==ind_arch(k)
            velo(k)=vel(m);
            if k==reng
                tope=1;
            end
            k=k+1;
        end
    end
end
color=['r' 'b' 'k']; for b=1:veces
    figure(1)
    plot(velo,volt_m(:,1+b),strcat(color(b),'o'))
    xlabel('velocidad (cm/s)')
    ylabel('voltaje (volts)')
    hold on
end

result=zeros(reng,veces+2); result(:,1)=transpose(velo);
result(:,2:veces+1)=volt_m(:,2:veces+1);
result(:,veces+2)=transpose(voltaje);

op=lower(input('Seleccionar puntos especificos (s/n)? ','s')); if
op=='s'
    w=1;
    for p=1:reng
        leyenda=['Escoger el punto ',num2str(p),' (s/n)? '];
        op2=lower(input(leyenda,'s'));
        if op2=='s'
            vcorre(w)=voltaje(p);
            velcorre(w)=velo(p);
            w=w+1;
        end
    end
    end
%par=polyfit(vcorre.^2,velcorre.^(1/3),1);
par=polyfit(velcorre.^(1/3),vcorre.^2,1);
coefa=par(2)
coefb=par(1)
%x=0:0.5:5;
%y=(par(1).*x.^2+par(2));
x=0:3:45;
y2=(par(1).*x.^(1/3)+par(2));

figure(2)
%plot(x.^2,y,'r:',vcorre.^2,velcorre.^(1/3),'bo')
plot(x.^(1/3),y2,'r:',velcorre.^(1/3),vcorre.^2,'bo')
xlabel('vel exp(1/3)')
ylabel('V^2')

elseif op=='s'
%par=polyfit(voltaje.^2,velo.^(1/3),1)
par=polyfit(velo.^(1/3),voltaje.^2,1)
coefa=par(2)
coefb=par(1)
x=0:3:45;

```

```

y2=(par(1).*x.^(1/3)+par(2));

figure(2)
plot(x.^(1/3),y2,'r:',velo.^(1/3),voltaje.^2,'bo')
xlabel('vel exp(1/3)')
ylabel('V^2')

end

```

### Diámetro equivalente burbujas

```

%programa para medir el diametro equivalente de burbujas

clear all;

%numero de divisiones de la foto y burbujas
part_hor=3; part_ver=3; bxfoto=3;
%escala pixeles milimetros
pixh=1076.7; pixv=1649.5; mmh=29.5; mmv=45;

%ubicacion del archivo
carpeta='agua glic50';

archivo='DSCF0085.JPG';

%archivo resultados
diametros='diam17_3.txt';
archiresul='resul17_3.txt';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ruta=['c:\hilo\fotos_burbujas\',carpeta,'\'];

clf

set(figure(1),'visible','off');

nom=[ruta archivo];
foto=imread(nom,'JPG');

info=imfinfo(nom)
ancho=info.Width/part_hor;
alto=info.Height/part_ver;
g=0;
for j=1:part_ver

    for k=1:part_hor
        g=g+1;
        fcerca=foto(1+(j-1)*alto:j*alto,1+(k-1)*ancho:k*ancho,1:3);
        figure('Position',[0 0 size(fcerca,2) size(fcerca,1)]);
        image(fcerca)
        set(gca,'Position',[0 0 1 1]);
        set(gca,'units','pixel');
    end
end

```

```

        get (gca)
        posporfoto=4*bxfoto;
        [x,y]=ginput(posporfoto);
        for m=1:posporfoto
            posi(m+posporfoto*(g-1),1)=x(m);
            posi(m+posporfoto*(g-1),2)=y(m);
        end
        clf
    end
end
clear j
for j=1:part_ver*part_hor*bxfoto
    diam(j,1)=(mmh/pixh)*sqrt((posi(1+(4*(j-1)),1)-posi(2+(4*(j-1)),1))^2+
    (posi(1+(4*(j-1)),2)-posi(2+(4*(j-1)),2))^2);
    diam(j,2)=(mmv/pixv)*sqrt((posi(3+(4*(j-1)),2)-posi(4+(4*(j-1)),2))^2+
    (posi(3+(4*(j-1)),1)-posi(4+(4*(j-1)),1))^2);
    razd(j)=diam(j,1)/diam(j,2);           % razon de diametros
    dequiv(j)=(diam(j,1)*diam(j,1)*diam(j,2))^(1/3); % diametro equivalente
end dequiv=transpose(dequiv);
dequivalente=mean(dequiv) %promedio de los diametros equivalentes
deqstd=std(dequiv)       %desviacion estandar de los diametros equivalentes
razd_prom=mean(razd)    %promedio de la relacion de diametros
razstd=std(razd)       %desviacion estandar de la relacion de diametros

resul(1)=dequivalente; resul(2)=deqstd; resul(3)=razd_prom;
resul(4)=razstd;

datadiam=zeros(length(dequiv),2);
datadiam(:,1)=dequiv; %diametros equivalentes
razd2=transpose(razd);
datadiam(:,2)=razd2; %relaciones de diametros

ubicacion=strcat('c:\hilo\fotos_burbujas\',carpeta,'\',diametros);
save(ubicacion,'datadiam','-ASCII');

ubicacion2=strcat('c:\hilo\fotos_burbujas\',carpeta,'\',archiresul);
save(ubicacion2,'resul','-ASCII');

```

# Presentaciones en conferencias

Palacios C., Martínez J., Zenit R., **Medición de la velocidad fluctuante de la fase continua en una mezcla gas-líquido**, IX Congreso, División de Dinámica de Fluidos, Sociedad Mexicana de Física. Instituto Mexicano del Petróleo, Noviembre 2003.

Palacios C. **Medición de la velocidad fluctuante de la fase continua en una mezcla gas-líquido**, II Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Zacatepec. Morelos, Marzo 2004.