

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y NUCLEAR



**MEDIDA EXPERIMENTAL DE LA CONCENTRACIÓN DE
ÁREA INTERFACIAL EN FLUJOS BIFÁSICOS FINAMENTE
DISPERSOS Y EN TRANSICIÓN**

Programa Doctoral en Tecnología Energética

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

Santos Méndez Díaz

Dirigida por:

Dr. D. José Luís Muñoz-Cobo González

Dr. D. Sergio Chiva Vicent

Valencia, 9 de septiembre de 2008

TESIS DOCTORAL

MEDIDA EXPERIMENTAL DE LA CONCENTRACIÓN DE
ÁREA INTERFACIAL EN FLUJOS BIFÁSICOS FINAMENTE
DISPERSOS Y EN TRANSICIÓN

Realizada por: D. Santos Méndez Díaz
Dirigida por: Dr. D. José Luís Muñoz-Cobo González
Dr. D. Sergio Chiva Vicent

TRIBUNAL CALIFICADOR

PRESIDENTE: Dr. Gumersindo Verdú Martín
SECRETARIO: Dr. Facundo Alberto Escrivá Castells
VOCALES TITULARES:
Dr. José Enrique Juliá Bolívar
Dr. Lluís Batet Miracle
Dr. Joaquín Navarro Esbrí

VOCALES SUPLENTE:
Dr. José González Macia
Dr. Francesc-Josep Reventos Puigjaner

Valencia, 9 de septiembre de 2008



A mi familia



Agradecimientos

En primer lugar deseo agradecer infinitamente al Dr. José Luís Muñoz-Cobo González la oportunidad y la confianza me brindó para la realización de mi doctorado en el grupo de Termohidráulica e Ingeniería Nuclear que tan exitosamente dirige. Agradezco también al Dr. Sergio Chiva Vicent la ayuda que en el ámbito profesional y personal me proporcionó durante estos largos años llegando a ser, en más de una ocasión, la fuerza que me impulsó a terminar este trabajo en los días más aciagos. A mis directores de tesis muchas gracias.

Al Dr. José Enrique Juliá Bolívar quiero agradecer la ayuda que me brindo tan noblemente siempre que la solicité en América y en Europa, al Dr. Facundo Alberto Escrivá Castells por los consejos y comprensión que me proporcionó y al Dr. Juventino Santiago Ruiz por su gran ayuda en el ámbito personal y profesional. En especial quiero agradecer al Dr. Roberto Zenit Camacho por confiar en mí y brindarme la oportunidad de continuar con mi desarrollo profesional en México, en mi *alma mater*.

Deseo expresar mi gratitud también a los entrañables amigos que fueron mi familia mientras he vivido lejos de la mía: Israel, Emilio y Kleydi, así como a mis compañeros de trabajo en el Instituto de Ingeniería Energética Carlos Afranio, Adolfo, Javier, David, Fernando, Alice, Rogelio y Daniel. A mis connacionales residentes en España con los cuales pasé largas horas de alegría que me hicieron menos lejana mi patria: Alexander, Guillermo, Pablo, Humberto, Salvador, Carlos Alonso, Cesar, Jesús, Raymundo, Alfredo, Daniel, Isabel y a sus adorables familias.

Agradezco infinitamente a mis padres por la confianza y el amor interminable que me han dado a lo largo de mi existencia, ahora que tengo la oportunidad de ser padre comienzo a entender hasta donde puede llegar el amor y cariño. También brindo éste trabajo a la luz de mi vida: Fati. Por último deseo agradecer en especial a la persona que ha permanecido a mi lado estos dos últimos años con sus desvelos, comprensión y amor, a mi adorada y linda esposa, a mi Piporra.



Resumen

En años recientes se han realizado esfuerzos para incrementar la comprensión de los fenómenos asociados al flujo bifásico líquido – gas, para lo cual se han establecido modelos matemáticos que intentan reflejar el comportamiento del flujo, como es el caso del modelo de los Dos Fluidos. Una causa de la complejidad que representa el modelado es la transferencia de masa, momento y energía entre fases debida a la interacción entre fases. Actualmente los modelos de cálculo empleados en CFD y en códigos termohidráulicos confían en correlaciones experimentales altamente dependientes del régimen de flujo para determinar el área interfacial, sin embargo este procedimiento no refleja la naturaleza física y se presentan irregularidades en la zona de la interfase debidas a fenómenos de transporte no descritos por estos modelos. En este sentido se ha propuesto recientemente una teoría de transporte de área interfacial que parece ser una solución viable al problema de la obtención de ecuaciones constitutivas del área interfacial y con ella, el cierre del modelo. Esta ecuación consta de términos convectivos y temporales que pueden ser resueltos analíticamente, por otro lado contiene términos fuente y sumidero que representan la creación y destrucción de burbujas que aún no han sido completamente modelados; para la comprensión de dichos términos es requerida información experimental, misma que este trabajo intenta generar mediante la obtención de una base de datos experimentales que aporten información útil para el modelado de sistemas bifásicos.

Para la obtención de la base de datos fue necesario diseñar, construir e instrumentar una instalación experimental que permitiera la formación de flujos bifásicos agua-aire con velocidades superficiales de fase líquida y gas similares a las existentes en los actuales reactores nucleares. El sistema de formación de mezcla bifásica que se diseñó y construyó permite la obtención de varios regímenes de flujo, en su funcionamiento emplea medios porosos frecuentemente utilizados en aplicaciones y configuraciones similares.

Entre las técnicas de medida empleadas se encuentra un completo sistema de visión artificial de alta velocidad de adquisición de imagen, anemometría laser que requirió del desarrollo de una metodología específica en el tratamiento de señal, y sensores de conductividad de cuatro puntas que fueron desarrollados explícitamente para este trabajo de investigación.

En la obtención de un prototipo útil de un sensor de conductividad fue necesario el desarrollo de un esquema de procesado de señal que permitiera extraer de las señales eléctricas información útil y discriminar al mismo tiempo el ruido eléctrico embebido en la señal, además dada su alta especialización, este sensor tuvo que ser construido de manera manual, también fue desarrollada una metodología de fabricación que redujo considerablemente el costo y tiempo de construcción, incrementando al mismo tiempo la calidad y fiabilidad de este instrumento así como la de sus resultados.

Los experimentos desarrollados en esta investigación implican medidas locales de los principales parámetros de flujo bifásico como son la concentración de área interfacial, fracción de huecos, velocidad interfacial, distribución del número de burbujas, tamaño de burbuja y velocidad superficial de la fase líquida. Las mediciones realizadas permiten conocer la evolución de las estructuras de flujo en regímenes *bubbly* y en transición *bubbly* a *slug*, para ello se emplearon las técnicas de medida locales antes descritas. Como parte de la validación de las técnicas y procesos de medida empleados, algunos resultados fueron comparados con los obtenidos por otro grupo de investigación con una amplia trayectoria en este campo.

Los resultados obtenidos permiten conocer valores promedio temporales de los parámetros de flujo antes mencionados y han sido comparados con los obtenidos por otros autores. La instrumentación empleada es capaz de brindar información útil acerca de la evolución de estos parámetros respecto a la variación de las condiciones de flujo iniciales. Así mismo fueron evaluados algunos procesos de interacción entre burbujas con base a desarrollos realizados por otros autores como parte de la validación de la información obtenida. Se espera que la información generada permita el desarrollo de relaciones constitutivas como lo es la ecuación de transporte de área interfacial que refleje los verdaderos efectos de influencia del área interfacial sobre el comportamiento global del flujo bifásico.

Abstract

In recent years efforts have been realised to increase the comprehension of the phenomena associated to the liquid - gas two-phase flow, for which mathematical models have settled down that try to reflect the comportment of the flow as it is the case of the model of both Fluid. A cause of the complexity that represents the modelled one is the mass transfer, moment and energy between phases due to the interaction between phases. At the moment the used models of calculation in CFD and thermal hydraulics codes trust experimental correlations highly employees of the flow regime to determine the interface area, nevertheless this procedure does not reflect the physical nature and they become appear irregularities in the zone of interphase due to phenomena of transport not described by these models. In this one sense a theory of transport of interface area has been recently propose that seems to be a viable solution to the problem of the obtaining of constituent equations of the interface area and with her, the closing of the model. This equation consists of convective terms and temporary that can be solved mathematically or analytically, on the other hand it contains terms source and drain that represent the creation and destruction of bubbles that not yet completely have been modelled; for the understanding of these terms it is required experimental information and this one deficiency the one that tries to palliate this one work by means of the obtaining of an experimental data base that contributes useful information for the modeleld two-phase systems.

For the obtaining of the data base it was necessary to design, to construct and to orchestrate an experimental installation that allowed to the formation of two-phase flows underwater-to-air with superficial velocities of liquid phase and gas similar to the existing ones in the present nuclear reactors. The system of formation of two-phase mixture that was designed and constructed allows the obtaining of several regimes of flow, in its operation it uses porous means frequently employees by other similar groups of investigation in applications and configurations.

Between the used techniques of measurement is a complete system of acquisition of image of high speed of capture, laser anemometry that required of the development of a specific methodology in the signal processing, and sensors of conductivity of four ends that were developed explicitly for this one work of investigation.

In the obtaining of a useful prototype of a conductivity sensor the development of a scheme of processing of signal that allowed to extract of the electrical signals useful information and at the same time to discriminate the contracted electrical noise in the signal, in addition given its high specialization was necessary, this sensor was to be construed of way manual, too was developed a manufacture methodology that considerably reduced to the cost and time of construction, increasing at the same time the quality and reliability of this instrument as well as the one of its results. The experiments developed in this investigation imply local measures of principals parameters of two-phase flow as they are the concentration of interface area, fraction of hollows, interface speed, distribution of I number of bubbles, size of bubble and superficial speed of the liquid phase. The realised measurements allow to know the evolution the flow structures in regimes bubbly and in transition bubbly to slug, for it the local techniques of measurement were used before described. Like part of the validation of the techniques and used processes of measurement, some results were compared with the obtained ones by another group of investigation with an ample trajectory in this one field.

The obtained results allow to know temporary values average the parameters of flow before mentioned and have been compared with the obtained ones by other authors. The used instrumentation is able to offer to useful information about the evolution these parameters with respect to the variation of the initial conditions of flow. Some processes of interaction between bubbles with base to developments realised by other authors like part of the validation of the obtained data were evaluated. One hopes that the obtained data allows the development of the constituent relations like is it the equation of transport of interface area that reflected the true influence of the interface area on comportment global of the two-phase flow.

Resum

En anys recents s'han realitzat esforços per incrementar la comprensió dels fenòmens associats al fluxe bifàsic líquid - gas, per al qual s'han establert models matemàtics que intenten reflectir el comportament del fluxe com és el cas del model dels Dos Fluïts. Una causa de la complexitat que representa el modelatge és la transferència de massa, moment i energia entre fases deguda a la interacció entre fases. Actualment els models de càlcul emprats en CFD i en codis termo-hidràulics confien en correlacions experimentals altament dependents del règim de flux per determinar l'àrea interfacial, tanmateix aquest procediment no reflecteix la naturalesa física i es fan presents irregularitats a la zona d'interfase degudes a fenòmens de transport no descrits per aquests models. En aquest sentit ha estat proposada recentment una teoria de transport d'àrea interfacial que sembla ser una solució viable al problema de l'obtenció d'equacions constitutives de l'àrea interfacial i amb ella, el tancament del model. Aquesta equació consta de termes convectius i temporals que poden ser resolts matemàtica o analíticament, d'altra banda conté termes font i clavegueram que representen la creació i destrucció de bombolles que encara no han estat completament modelats; per a la comprensió dels esmentats termes és requerida informació experimental i aquesta manca la que intenta pal·liar aquest tesi mitjançant l'obtenció d'una base de dades experimentals que aporten informació útil per al modelatge de sistemes bifàsics

Per a l'obtenció de la base de dades va ser necessari dissenyar, construir i instrumentar una instal·lació experimental que permetés la formació de fluxes bifàsics aigua-aire amb velocitats superficials de fase líquida i gas similars a les existents als actuals reactors nuclears. El sistema de formació de mescla bifàsica que es va dissenyar i va construir permet l'obtenció de diversos règims de fluxe, en el seu funcionament emprava medis porosos freqüentment emprats per altres grups d'investigació en aplicacions i configuracions similars.

Entre les tècniques de mesura emprades es troba un complet sistema d'adquisició d'imatge d'alta velocitat de captura, anemometria làser que va requerir del desenvolupament d'una metodologia específica en el tractament de senyal, i sensors de conductivitat de quatre puntes que van ser desenvolupats explícitament per a aquesta tesi d'investigació.

En l'obtenció d'un prototip útil d'un sensor de conductivitat va ser necessari el desenvolupament d'un esquema de processat de senyal que permetés extreure dels senyals elèctrics informació útil i discriminar alhora el soroll elèctric embegut en el senyal, a més donada la seua alta especialització, aquest sensor va haver de ser construït de manera manual, també va ser desenvolupada una metodologia de fabricació que va reduir considerablement el cost i temps de construcció, incrementant alhora la qualitat i fiabilitat d'aquest instrument així com la dels seus resultats. Els experiments desenvolupats en aquesta investigació impliquen mesures locals dels principals paràmetres de fluxe bifàsic com són la concentració d'àrea interfacial, fracció de buits, velocitat interfacial, distribució del número de bombolles, mida de bombolla i velocitat superficial de la fase líquida. Els mesuraments realitzats permeten conèixer l'evolució de les estructures de fluxe en règims bubbly i en transició bubbly a slug, per a això es van emprar les tècniques de mesura locals abans descrites. Com a part de la validació de les tècniques i processos de mesura emprats, alguns resultats van ser comparats amb els obtinguts per un altre grup d'investigació amb una àmplia trajectòria en aquest camp.

Els resultats obtinguts permeten conèixer valors mitjans temporals dels paràmetres de fluxe abans esmentats i han estat comparats amb els obtinguts per altres autors. La instrumentació emprada és capaç de brindar informació útil sobre l'evolució d'aquests paràmetres respecte a la variació de les condicions de fluxe inicials. Es van avaluar alguns processos d'interacció entre bombolles sobre la base de desenvolupaments realitzats per altres autors com a part de la validació de la informació obtinguda. S'espera que la informació obtinguda permeta el desenvolupament de les relacions constitutives com ho és l'equació de transport d'àrea interfacial que reflexe els verdadera influència de l'àrea interfacial sobre el comportament global del fluxe bifàsic.

ÍNDICE

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Índice	xiii
Capítulo 1. Introducción	I
Capítulo 2. Antecedentes	II
Capítulo 3. Sonda de conductividad	III
Capítulo 4. Instalación experimental e instrumentación	IV
Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales	V
Capítulo 6. Análisis de resultados	VI
Capítulo 7. Conclusiones y líneas de trabajos futuros	VII
Anexo	A

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación	I - 1
1.2 Objetivos.....	I - 4
1.3 Desarrollo de la tesis	I - 5
1.4 Nomenclatura	I - 6
1.5 Referencias	I - 6

1.1 Motivación

Esta tesis doctoral es fruto del trabajo del grupo de investigación Termohidráulica e Ingeniería Nuclear del Instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia, cuyas actividades se centran en el estudio termohidráulico de reactores nucleares y en la seguridad de centrales de generación de energía eléctrica mediante el empleo de energía nuclear. Las líneas de investigación que abarca este grupo son:

- Termohidráulica de reactores nucleares
- Estabilidad de reactores nucleares
- Dinámica de fluidos computacional
- Cálculo y medida de la criticidad
- Análisis de licencia y consecuencias radiológicas
- Generación de hidrógeno en centrales nucleares
- Análisis de reactores de seguridad pasiva
- Termohidráulica experimental

Es dentro de la última línea de investigación en la que se ha desarrollado este trabajo, que se centra en el desarrollo de un sistema de medida y la construcción de una instalación experimental (llamada PUMA) para obtener información que permita validar modelos teóricos de flujos bifásicos líquido – gas en los cuales la fase continua es agua y la fase dispersa es aire. El flujo bifásico involucra el flujo de dos fases de la misma o de diferentes sustancias. Los flujos bifásicos se encuentran presentes en gran cantidad de aplicaciones industriales como son la refrigeración, máquinas de combustión interna, procesos de destilación, separadores de fase, transporte de petróleo en tuberías, producción de vapor para la generación de energía eléctrica, entre otros ejemplos.

La producción de energía eléctrica mediante centrales nucleares representó el 17 % del total producido en el año 2007 en España¹. El factor de carga, definido como la energía eléctrica producida respecto al funcionamiento nominal, fue aproximadamente del 82 % lo cual indica que las centrales nucleares operan a lo largo del año de manera continua.

¹ Ministerios de Industria, comercio y turismo

Este elevado factor de utilización obliga a garantizar el funcionamiento seguro y confiable en condiciones normales de operación y, que en caso de ocurrir, en condiciones de operación fuera de las nominales y garantizar que la integridad de la central este asegurada; en este sentido es indispensable contar con herramientas de diagnóstico exactas y fiables. Programas de cómputo para simular el funcionamiento de una central nuclear se emplean para predecir la respuesta de la central nuclear ante condiciones dentro y fuera de los límites normales de operación. Dichos programas de análisis son llamados Códigos Termohidráulicos y ejemplos de ellos son RELAP5, TRAC-PF1 y CATARE.

Un uso particular de estos códigos termohidráulicos es la realización de simulaciones de accidentes y procesos transitorios en centrales nucleares, para ello emplean modelos de flujos bifásicos como el modelo de **Dos Fluidos**, el cual fue formulado en 1975 como una alternativa en el modelado de sistemas bifásicos [Ishii1975]. Este modelo trata a cada fase por separado mediante las ecuaciones de conservación y condiciones de salto que involucran la transferencia interfacial de la masa, momento y energía para cada fase. Mediante métodos apropiados de promediado la formulación macroscópica es obtenida, en la cual se hacen presentes nuevos términos de interacción que acoplan el transporte de masa, momento y energía de cada fase a través de las interfases (términos fuente y sumidero). Los términos de transferencia entre fases son expresados en términos de la concentración de área interfacial, a_i , y una fuerza conductora tal que:

Términos de transferencia interfacial $\sim a_i \times$ (Fuerza conductora)

Es posible determinar cualquier término de transferencia interfacial como el producto de una fuerza conductora y la concentración de área interfacial, la cual es definida como el área total de la interfase por unidad de volumen de la mezcla y especifica la capacidad geométrica de la transferencia interfacial de masa, momento y energía.

En los códigos termohidráulicos la concentración de área interfacial es modelada empleando relaciones constitutivas dependientes del régimen de flujo y de los criterios de transición de régimen, por ejemplo RELAP5 y TRAC emplean mapas de regimenes de flujo que representan la estructura interfacial en términos de parámetros geométricos, velocidades de fase y Fracciones de huecos. El principal problema de esta metodología radica en que los mapas de régimen de flujo se obtienen a partir de flujos totalmente desarrollados y en condiciones estacionarias, y sin embargo son aplicadas en condiciones de simulaciones tanto estacionarias como transitorias.

Capítulo 1. Introducción

Esto puede generar cambios instantáneos de régimen induciendo oscilaciones en el comportamiento del sistema físicamente imposibles, además de limitar la exactitud del código y generar resultados que no reflejan la naturaleza física de los fenómenos asociados. Es por esta razón que deben ser desarrollados modelos que predigan el comportamiento macroscópico del flujo bifásico de forma confiable.

El mayor defecto del modelo de los Dos Fluidos es la carencia de la relación de cierre para la concentración de área interfacial. Actualmente el empleo de este modelo confía en correlaciones experimentales para la concentración de área interfacial, sin embargo estas correlaciones dependen en gran medida del régimen y de la geometría en las direcciones de flujo. Esto pone de manifiesto que es indispensable una relación de cierre para la concentración de área interfacial y un método detallado de medida para una solución exacta del modelo de los Dos Fluidos.

Ishii y Mishima [Ishii1984] han propuesto tratar a la concentración de área interfacial como una variable más de transporte. La ecuación de transporte de área interfacial que muestra en la expresión 1.1, involucra en la parte izquierda términos de la variación temporal y convectiva respectivamente que pueden ser resueltas mediante herramientas de cálculo. El lado derecho contiene términos de generación o fuente y destrucción o sumidero debidos principalmente a la turbulencia y al cambio de fase, cuya solución esta aún en desarrollo.

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla \cdot (v_i a_i) = \sum \phi_i + \phi_{ph} \quad (1.1)$$

Uno de los problemas que se encuentra ésta nueva técnica numérica es que no existen todavía modelos capaces de predecir con precisión los términos fuente y sumidero. Y esto es debido a que es necesario disponer de datos experimentales precisos para su desarrollo. Hasta ahora la mayoría de las bases de datos públicamente disponibles disponían de información poco detallada y casi siempre muy promediada, pensada para códigos 1D, mayoritarios en la industria nuclear. Así pues, se hace necesario disponer de bases de datos experimentales capaces de estudiar con detalle la configuración del flujo bifásico.

Existen técnicas de medida que aportan información acerca de los principales parámetros locales de flujo bifásico, pero hay que indicar que salvo algunos casos de indicadores químicos, la concentración de área interfacial es una magnitud derivada, y siempre se ha de determinar en función de parámetros indirectos.

Dentro de estas técnicas de medida se encuentra una que aprovecha la diferencia entre la conductividad eléctrica del agua y del aire para generar información acerca de la fracción de huecos, la velocidad superficial de burbuja y la concentración de área interfacial, además de la distribución del menor de burbujas y del tamaño. Este método de medida es llamado sonda de conductividad y ha tenido mucha aceptación por investigadores en años recientes debido a que se ha empleado desde 1960.

Esta técnica de medida ha sido elegida debido a su bajo coste de elaboración, a la precisión espacial y temporal de las medidas que a partir de este instrumento se obtiene, a la facilidad de su integración con otros sistemas de medida y a su relativa facilidad de fabricación. Se ha empleado también un sistema de anemometría láser como parte del sistema de medida y aunque su aplicabilidad es limitada en sistemas con altas fracciones de huecos aporta información valiosa acerca de la hidrodinámica de la fase líquida.

Las técnicas de medida han permitido la obtención de datos experimentales con su utilización. En este estudio ha sido elegida una sección de ensayo cilíndrica vertical y de área constante en donde el flujo se desarrolla en la dirección ascendente. Esta configuración fue elegida debido a que en la industria esta configuración es muy común en reactores químicos y en generadores de vapor por mencionar algunos ejemplos, además permite el desarrollo de flujo estable y bien desarrollado con condiciones de contorno bien establecidas. Bases de datos experimentales han comenzado a generarse con diferentes configuraciones geométricas y en distintas condiciones de flujo. Hasta el momento mucha de la información experimental disponible estaba limitada al valor promedio de volumen o de línea de un parámetro de flujo sobre una sección de un canal de flujo, una ventaja del sistema de medida y la instalación experimental construida es la posibilidad de realizar mediciones locales y temporales.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es el desarrollo de un sistema de medida de las principales características locales de flujos bifásicos agua aire, así como la construcción de una instalación experimental que permita el ensayo de flujos bifásicos en regímenes bubbly y en transición.

Para ello, como objetivos secundarios, será necesario diseñar, construir y validar un prototipo de sonda de conductividad, como una técnica local de medida experimental, que permite realizar mediciones experimentales en un sistema bifásico líquido-gas.

Del mismo modo es necesario establecer un esquema de adquisición y procesado adecuado de la información obtenida a partir de la utilización del sistema de medida, tanto para la sonda como para el sistema de anemometría láser en flujos bifásicos agua-aire.

A partir de la información obtenida con el sistema de medida y con la utilización de la instalación experimental se pretende crear una base de datos que aporte información fiable de la concentración de área interfacial así como de los principales parámetros de flujo bifásico. En este sentido dicha base de datos incorporará información de las principales características del flujo bifásico que permitirá estudiar fenómenos de transporte con vistas a la validación de modelos teóricos más completos y eficientes.

1.3 Desarrollo de la tesis

Para alcanzar los objetivos antes expuestos, la presente tesis fue estructurada de la siguiente forma. El primer capítulo presenta la motivación y los objetivos principales de esta tesis. Un segundo capítulo presenta de manera breve el estado del arte en cuanto al modelado de sistemas bifásicos, concretamente el modelo de los Dos Fluidos, la Ecuación de Transporte de Área Interfacial y términos de interacción entre fases desde un punto de vista mecanicista. También son presentados algunos datos acerca de los trabajos desarrollados por distintos grupos de investigación y por último se aborda el estado del arte en cuanto a instrumentación empleada en la medida de los principales parámetros de flujo bifásico, incluida la sonda de conductividad.

La técnica de medida empleada en este trabajo es detallada en el capítulo tres exponiendo el proceso de diseño, construcción, calibración y operación con la finalidad de validar el uso de esta técnica de medida. Debe señalarse que la información generada es contrastada indirectamente con información obtenida a partir de la instrumentación instalada en el arreglo experimental, y contrastada directamente con información experimental publicada por otros autores.

El capítulo cuatro muestra la instalación experimental construida, la instrumentación con la cual fue dotada y el software de control y procesado de información. Como parte de la instrumentación se encuentra un sistema de anemometría láser que permite obtener información experimental del perfil de velocidades e intensidad de turbulencia de la fase líquida que complementa la información generada a partir la sonda de conductividad.

Un quinto capítulo expone los resultados obtenidos mediante la utilización de la instalación e instrumentación descritos en los capítulos precedentes a éste. El análisis de los datos es expuesto en el capítulo 6.

Las conclusiones y trabajos futuros se exponen en el capítulo 7, mientras que las publicaciones derivadas de éste trabajo e información complementaria son mostradas en el anexo. Como comentario final debe indicarse que las últimas secciones de cada capítulo son indicadas la nomenclatura empleada y las referencias bibliográficas.

1.4 Nomenclatura

a_i	Concentración de área interfacial
v_i	Velocidad interfacial
t	Tiempo

Símbolos griegos

ϕ_{B-C}	Interacción entre fases debidas a interacción de burbujas
ϕ_{ph}	Interacción entre fases debidas a cambio de fases

Subíndices

i	Interfase
$B-C$	Desintegración y coalescencia
ph	Cambio de fase

1.5 Referencias

[Ishii1975]. Thermo-Fluid dynamics theory of two-phase flow. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricite de France, Eyrolles, Paris (1975).

[Ishii1984]. M. Ishii and K. Mishima. Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations, Nuclear Engineering Design. 82 (1984) 107–126.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Introducción	II - 1
2.2 Modelado de Sistemas Bifásicos.....	II - 2
2.2.1 Estado del arte	II - 2
2.2.2 Descripción del modelo	II - 4
2.3 Base de datos experimentales	II - 16
2.4 Técnicas de medida en flujo bifásico.....	II - 19
2.4.1 Anemometría de hilo caliente	II - 19
2.4.2 Técnicas Basadas en Ultrasonidos	II - 22
2.4.3 Técnicas Basadas en la Visualización.....	II - 23
2.4.4 Técnicas Ópticas	II - 25
2.4.5 Técnicas eléctricas	II - 32
2.5 Nomenclatura	II - 37
2.6 Bibliografía y referencias.....	II - 39

2.1 Introducción

Este capítulo aborda el estado del arte en el modelado de flujos bifásicos, la información experimental disponible para la validación de dichos modelos y la instrumentación empleada en la obtención de dicha información experimental. Una primera sección aborda brevemente los esfuerzos que se han realizado recientemente en el modelado de los flujos bifásicos dentro del modelo de los Dos Fluidos.

Una segunda sección expone la información experimental que se ha generado en los últimos años con vistas a la creación de bases de datos que permitan completar relaciones de cierre del modelo de los dos Fluidos. Una tercera y última parte aborda las técnicas de medida empleadas en la generación de información experimental de los parámetros más importantes de flujos bifásicos como pueden ser el tamaño de burbuja, velocidad superficial y desde luego, la concentración de área interfacial, entre otros. Cada técnica es descrita de manera general y se menciona la información que a partir de su utilización se obtiene. Como técnicas empleadas en este trabajo se incluyen la anemometría láser de efecto Doppler, visión artificial y una técnica eléctrica: la sonda de conductividad.

2.2 Modelado de Sistemas Bifásicos

2.2.1 Estado del arte

De manera General se emplean dos tipos de modelos teóricos para describir sistemas de flujo bifásico: los Modelos de Mezcla (por ejemplo el Modelo Drift Flux [Zuber1965]) y los Modelos de Flujos Separados (el modelo de los Dos Fluidos, un ejemplo de ellos [Ishii1975] [Ishii2006]), ambos requieren relaciones constitutivas para cerrar el modelo analíticamente para algunos parámetros importantes como son el parámetro de distribución y velocidad de deriva o *drift*, en el caso del modelo Drift Flux; y para el coeficiente de fricción y la concentración de área interfacial para el modelo de los Dos Fluidos.

Un problema de flujo bifásico puede ser descrito por cualquiera de estos dos modelos. La principal diferencia entre ambos es el tratamiento matemático que se da a ambas fases, por ello la calidad de los resultados depende en gran medida del grado de acoplamiento que exista entre dichas fases y es precisamente ésta la principal complicación en ambos casos.

El modelo Drift Flux es empleado frecuentemente debido a su simplicidad en cuanto a la obtención de las ecuaciones de campo y relaciones constitutivas [Nacef2007] [Cheng2006] [Gillard2007] [Guet2004]. Este modelo es muy exacto cuando ambas fases están unidas fuertemente, es también muy recomendable en flujos bifásicos dispersos, sin embargo en sistemas en los cuales la inercia de las fases puede ser considerada por separado, como es el caso de flujo anular, la aplicabilidad es dudosa y limitada. La principal hipótesis del modelo es que la dinámica de ambas fases puede ser expresada en términos de una ecuación de conservación de momento de mezcla, el movimiento relativo entre fases es especificado con una ecuación constitutiva cinemática. Los campos de velocidad están expresados en términos de la velocidad del centro de masa de la mezcla y la velocidad *drift* de la fase dispersa. Dado que la transferencia de masa y momento en la interfase depende de la estructura de fase, las ecuaciones constitutivas para la velocidad *drift* y la generación de vapor son funciones del régimen de flujo [Ishii1975].

Por otra parte el modelo de los Dos Fluidos da a cada fase un tratamiento particular, tratamiento que consiste en establecer para cada fase las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, de modo que además de las ecuaciones de conservación, son requeridas condiciones de salto que involucran la transferencia de masa, momento y energía en la interfase.

Capítulo 2. Antecedentes

En 1975 Ishii [Ishii1975] empleando un método de promediado apropiado formuló el modelo de Dos Fluidos en el que cada fase es considerada por separado en función de las ecuaciones de masa, momento y energía. En 1984 [Ishii1984] desarrolló un modelo tridimensional empleando un promediado temporal y un modelo unidimensional empleando un promediado espacial. De estos trabajos resultó evidente que los términos de transporte interfaciales pueden ser descritos en función del producto de la concentración de área interfacial y una fuerza conductora de dicha transferencia.

$$(\text{Términos de transferencia interfacial}) \sim a_i \times (\text{Fuerza conductora})$$

La concentración de área interfacial es un término clave en el cierre del modelo de los dos fluidos. Se han propuesto básicamente dos vías para la obtención de la concentración de área interfacial, una de ellas es el empleo de correlaciones empíricas cuya principal desventaja es el limitado espectro de condiciones bajo las cuales es fiable su aplicación. Un segundo método es emplear balances de poblaciones que actualmente está siendo desarrollado por algunos grupos de investigación [Prasser2007] [Yeoh2007], la ecuación de transporte de área interfacial volumétrica es un ejemplo de esta metodología.

Kocamustafaogullari y colaboradores [Kocamustafaogullari1983] formularon una ecuación de transporte unidimensional para predecir la densidad del número de burbujas promedio considerando un canal en ebullición con una sección de área constante. Reyes [Reyes1989] desarrollo una ecuación de transporte de la densidad del número de burbujas para partículas fluidas esféricas dispersas químicamente no reactivas a partir de un desarrollo de balance poblacional. En 1995 Kocamustafaogullari y colaboradores [Kocamustafaogullari1995] a partir del modelo de Reyes obtuvieron la ecuación de transporte de área interfacial basada en mecánica estadística.

La ecuación de transporte de área interfacial propone que la concentración de área interfacial sea tratada como una variable más de transporte junto con la masa, momento y energía. Fue propuesta en 1994 por Kocamustafaogullari y colaboradores [Kocamustafaogullari1994], demostraron que la densidad del número de burbujas es un factor esencial que determina la concentración de área interfacial y proponen una ecuación de transporte de la densidad de número de burbujas a partir de la cual es posible obtener la ecuación de transporte de área interfacial. Esta ecuación incorpora términos fuente y sumidero de burbujas producto de la interacción entre fases (condensación y ebullición) y entre burbujas (coalescencia y desintegración).

Ishii y colaboradores [Ishii1998] proponen un desarrollo general para tratar a las burbujas en dos grupos: esféricas y distorsionadas por un lado, y cap/slug por otro de manera que obtienen dos ecuaciones de transporte de la densidad del número de burbujas que incluye interacciones intra-grupales y extra-grupales. Morel y colaboradores [Morel1999] también derivaron una ecuación de transporte área interfacial volumétrica local a partir de consideraciones geométricas.

La interacción entre partículas se ha estudiado desde el siglo XIX. Modelos mecanicistas de desintegración de burbujas se han desarrollado desde la década de 1960 con la teoría de la película fluida basadas en observaciones de interacciones de burbujas y gotas [Jackson1964] [Howart1964]. Un nuevo avance surgió con los trabajos de Prince [Prince1990] que desarrolló modelos de desintegración y de coalescencia de burbujas en columnas verticales, además introdujo un factor de eficiencia de colisiones.

En el modelado de los términos fuente y sumidero se han desarrollado ecuaciones de transporte de área interfacial que incluyen términos fuente y sumidero para un grupo [Wu1998] [Hibiki2000] y para dos grupos [Hibiki2000a].

Cheung y colaboradores [Cheung2007] han desarrollado un modelo partiendo de la ecuación de transporte de la densidad del número de burbujas que incluye términos de interacción entre fases propuestos por distintos investigadores [Wu1998] [Hibiki2002] y [Yao2004]. Esta línea de modelado sigue desarrollándose y ha sido bien acogida por otros grupos ya que los resultados que reporta son de gran interés, sobretudo en la evolución espacial de la estructura de fase en las direcciones radial y axial.

2.2.2 Descripción del modelo

La ecuación de balance general de una cantidad ψ_k de la fase k por unidad de masa puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho_k \psi_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\nu_k \rho_k \psi_k) = -\nabla \cdot J_k + \rho_k \varphi_k \quad (2.1)$$

Donde ρ_k es la densidad de la fase k , J_k es el flujo a través de la superficie, φ_k la fuente de volumen. El primer término del lado izquierdo es la razón de cambio de la cantidad ψ_k y el segundo término es la razón de convección, ambos por unidad de volumen. El lado derecho de la expresión representa el flujo a través de la superficie y la fuente de volumen. Las condiciones de salto en su forma general se muestran a continuación:

$$\sum [\rho_k (v_k - v_i) \psi_k + J_k] \cdot n_k = s \quad (2.2)$$

Donde v_i es la velocidad del centro de masa de la partícula fluida y s es la fuente interfacial de la propiedad ψ . Las seis ecuaciones locales de conservación del modelo de los dos fluidos junto con las condiciones de salto se exponen a continuación.

Conservación de masa:

$$\frac{\partial(\rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k v_k) = 0 \quad (2.3)$$

Conservación de momento:

$$\frac{\partial(\rho_k v_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k v_k v_k) = -\nabla p_k + \nabla \cdot T_k + \rho_k g_k \quad (2.4)$$

Donde p_k , T_k , g_k son respectivamente termino de presión, tensor de esfuerzo viscoso y la fuerza de cuerpo.

Conservación de energía:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_k H_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k H_k v_k) = \\ -\nabla \cdot q_k + \nabla \cdot (T_k \cdot v_k) + \rho_k g_k \cdot v_k + \dot{q}_k \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$H_k = u_k + \frac{v_k^2}{2} \quad (2.6)$$

Donde u_k , q_k y \dot{q}_k son la energía interna, el flujo de calor y la generación interna de calor, respectivamente. Las ecuaciones de salto se enuncian a continuación. Para la masa, en donde v_i representa la velocidad del centro de masa de la partícula fluida:

$$\sum [\rho_k (v_k - v_i) \cdot n_k] = 0 \quad (2.7)$$

Para el momento:

$$\sum [(\rho_k (v_k - v_i) - T_k) \cdot n_k] = m_i \quad (2.8)$$

Para la energía:

$$\sum [\rho_k H_k (v_k - v_i) + (T_k \cdot v_k - q_k)] \cdot n_k = e_i \quad (2.9)$$

La formulación macroscópica es obtenida a partir de métodos apropiados de promediado: si las propiedades de la fase k tales como la velocidad, el momento o la energía en un punto dado pudieran ser graficadas en función del tiempo podrían aparecer discontinuidades abruptas en la interfase líquido – gas. Este fenómeno es similar a una señal eléctrica que requiere un filtrado, es por ello que el promediado actúa como un filtro de paso bajo el cual elimina las discontinuidades debidas al medio. Este promediado puede ser temporal, espacial, muestral o una combinación de ellos. Generalmente es de mayor interés práctico orientar el modelo hacia valores medios de las propiedades en los flujos. Esto lleva a escribir las ecuaciones en términos de las medias temporales de las diversas variables, es entonces cuando la aplicación de un promediado temporal de las ecuaciones instantáneas locales proporciona parámetros de campo continuos. Los promediados más comúnmente empleados se presentan a continuación.

Promediado Temporal:

$$F = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t F dt \quad (2.10)$$

Promediado volumétrico

$$\bar{F} = \frac{1}{V} \int_V F dV \quad (2.11)$$

Promediado muestral (ensemble average)

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N F_n \quad (2.12)$$

Para aplicaciones practicas, Ishii et. al. [Ishii1984] simplificaron el modelo de los Dos Fluidos como se menciona a continuación. La ecuación de balance general de la cantidad ψ_k para la fase k después el promediado temporal Euleriano esta dado por:

$$\frac{\partial \alpha_k \bar{\rho}_k \psi_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{\rho}_k \psi_k \hat{v}_k) + \nabla \cdot \alpha_k (\bar{J}_k + J_k^T) - \alpha_k \bar{\rho}_k \phi_k + I_k = 0 \quad (2.13)$$

Donde I_k es la fuente interfacial para la fase k dada por:

$$I_k \equiv -\frac{1}{\Delta t} \sum_{v_{kj}} \frac{1}{v_{kj}} \{n_k \cdot [\rho_k (v_k - v_i) \psi_k + J_k]\} \quad (2.14)$$

Aquí los subíndices j y k denotan la j-ésima y la k-ésima interfase, donde el superíndice T es para denotar la fluctuación turbulenta.

Las ecuaciones desarrolladas para la masa momento y energía se muestran a continuación. Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial (\alpha_k \bar{\rho}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{\rho}_k \hat{v}_k) = \Gamma_k \quad (2.15)$$

Ecuación de conservación de momento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\alpha_k \bar{\rho}_k \hat{v}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{\rho}_k \hat{v}_k \hat{v}_k) = \\ -\alpha_k \nabla \bar{p}_k + \nabla \cdot \alpha_k (\bar{\tau} + \tau_k^t) + \alpha_k \bar{\rho}_k \hat{g} + v_{ki} \Gamma_k + M_{ik} - \nabla \alpha_k \cdot \tau_i \end{aligned} \quad (2.16)$$

Ecuación de conservación de energía:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\alpha_k \bar{\rho}_k H_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{\rho}_k H_k \hat{v}_k) = \\ -\nabla \cdot \alpha_k (\bar{q}_k + q_k^t) + \alpha_k \frac{D_k}{Dt} p_k + H_{ki} \Gamma_k + \frac{q_{ki}''}{L_s} + \phi_k \end{aligned} \quad (2.17)$$

Donde Γ_k , M_{ik} , τ_i , y ϕ_k son la generación de masa, forma generalizada de la fuerza de arrastre interfacial, esfuerzo tangencial interfacial, flujo de calor interfacial y disipación viscosa respectivamente, con el subíndice i indicado en la interfase. L_s denota la longitud de escala en la interfase y tiene el significado físico de área interfacial por unidad de volumen. La concentración de área interfacial hace referencia a la superficie o área disponible a través de la cual ocurre la transferencia de masa, momento y energía entre fases por unidad de volumen de mezcla, esta definida en la ecuación 2.18.

$$a_i = \frac{1}{L_s} = \frac{\text{area interfacial}}{\text{volumen de mezcla}} \quad (2.18)$$

Los términos de transferencia interfacial de las ecuaciones 2.15, 2.16 y 2.17 llamados generación de masa por unidad de volumen, fuerza de fricción generalizada por unidad de volumen y transferencia de energía interfacial por unidad de volumen respectivamente, constituyen los términos de transferencia interfacial y pueden ser modelados tal como sigue. Generación de masa:

$$\Gamma_k \equiv a_i m_k \quad (2.19)$$

Fricción generalizada

$$M_{id} = \frac{\alpha_d F_D}{B_d} + \frac{\alpha_d F_v}{B_d} + \frac{9}{2} \frac{\alpha_d}{r_d} \sqrt{\frac{\rho_c \mu_m}{\pi}} \int_t \frac{D_d}{D\xi} (v_d - v_c) \frac{d\xi}{\sqrt{t - \xi}} \quad (2.20)$$

Transferencia de energía interfacial

$$\Gamma_k H_{ki} + \frac{q_{ki}''}{L_s} = a_i [m_k H_{ki} + h_{ki} (T_i - T_k)] \quad (2.21)$$

Los términos m_k , F_D , B_d , F_v y μ_m son la razón de transferencia de masa, fuerza de fricción estándar, volumen de una partícula fluida dispersa típica, fuerza de masa virtual y viscosidad de mezcla respectivamente. El primer miembro del lado derecho de la ecuación (2.20) es el término de transferencia interfacial debido a la fricción estándar puede simplificarse en términos de la concentración de área interfacial:

$$\frac{\alpha_d F_D}{B_d} = -a_i \left[\frac{C_D}{4} \left(\frac{r_{vm}}{r_D} \right) \frac{\rho_c v_r |v_r|}{2} \right] \quad (2.22)$$

De las expresiones anteriores, se observa que los términos de interacción entre fases son expresados en términos de la concentración de área interfacial y la fuerza conductora tal que:

(Términos de transferencia interfacial) $\sim a_i \times$ (Fuerza conductora)

Capítulo 2. Antecedentes

Estos campos macroscópicos promediados no son independientes entre sí: se hacen presentes nuevos términos que contemplan la interacción entre fases que acoplan el transporte de masa, momento y energía a través de las interfaces, además se hace evidente la importancia de la concentración de área interfacial.

Hasta el momento correlaciones experimentales proporcionan, bajo ciertos supuestos, la concentración de área interfacial pero son aplicables sólo en los regímenes de flujo bajo los cuales fueron definidas y no son extrapolables a otras condiciones, ello genera la existencia de vacíos de información en regímenes en transición. Dichas correlaciones dependen fuertemente de factores geométricos predefinidos y no son aplicables a ciertas geometrías. Esta metodología es problemática ya que no se refleja la naturaleza dinámica del fluido debido a que solamente se han realizado experimentos estáticos y el salto entre regímenes sólo es representado como un escalón en el que no existe transición, sin mencionar la enorme dependencia de la geometría a partir de la cual se obtuvo la información experimental no extrapolable a un espacio 3D. Códigos de dinámica de fluidos computacional (CFD) como el CFX y códigos termohidráulicos como el TRAC o RELAP5 emplean esta metodología en la determinación de la concentración de área interfacial y cierre del modelo.

Esto pone de manifiesto que la relación de cierre y un método detallado de medida para la concentración de área interfacial son indispensables para una solución exacta empleando el modelo de los Dos Fluidos. Para resolver este problema Ishii y Mishima [Ishii1984] han propuesto tratar a la concentración de área interfacial como una variable más de transporte que incorpore información de las interacciones entre fases.

La ecuación de transporte de área interfacial intenta reflejar dinámicamente la variación de la concentración de área interfacial independientemente del régimen de flujo. La formulación de la ecuación de transporte de la concentración de área interfacial en un flujo bifásico se basa en la ecuación de transporte de Boltzman. Dado que el área interfacial esta fuertemente relacionada a la transferencia del número de partículas, la Ecuación de Transporte de Área Interfacial puede ser formulada análogamente a la ecuación de transporte de Boltzman:

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla \cdot (v_i a_i) = \sum_j \phi_j + \phi_{ph} \quad (2.23)$$

La primera parte de la expresión contempla la variación temporal y convectiva respectivamente y la solución analítica de ambas puede ser obtenida mediante el empleo herramientas de cálculo. La otra parte de la expresión contempla términos que representan el cambio de la concentración de área interfacial debido a la generación y destrucción de burbujas, y a los procesos de cambio de fase¹ respectivamente. La solución de esta parte aún en desarrollo y es requerido un tratamiento cuidadoso pues están involucrados los fenómenos de desintegración y formación de burbujas debidos a la turbulencia y al cambio de fase principalmente. Este nuevo problema se intenta resolver mediante la clasificación de las burbujas en grupos dependiendo del tamaño y forma que posean.

2.2.2.1 Mecanismos de interacción entre partículas

Los mecanismos de interacción y los fenómenos de transporte dependen de los diferentes tipos de burbujas. Si solamente existen burbujas esféricas o distorsionadas sólo será necesario utilizar una grupo, esto significa que bastará con una ecuación de transporte del área interfacial. En cambio si coexisten burbujas con alto grado de distorsión, cups, slug, etc. será necesario agregar una nueva ecuación de transporte que considere la interacción entre estas burbujas. Cuando se consideran dos grupos de burbujas no sólo es necesario definir los mecanismos de desintegración, coalescencia y cambio de fase de cada grupo, además habrá que agregar mecanismos para la interacción entre estos grupos.

En algunas circunstancias las condiciones de flujo provocan solamente la existencia de partículas esféricas o distorsionadas por lo que el grupo 2 se encuentra “vacío” y es posible obtener una ecuación de transporte de área interfacial para el grupo 1 (burbujas esféricas y distorsionadas). Esto ocurre en el régimen de flujo *bubbly* finamente disperso. Por otra parte, cuando las condiciones provocan la aparición de burbujas de diferentes tamaños y formas es necesario establecer un criterio para discriminar ambos grupos, entonces se habla de radio crítico [Kocamustafaogulari1994] que define un tamaño crítico de burbujas que permite discriminar burbujas esféricas y distorsionadas del grupo 1 de burbujas slug/cap del grupo 2.

La sección de área influye también en los mecanismos de interacción. Hibiki y colaboradores [Hibiki2001a] reportan que los mecanismos de coalescencia dominantes son distintos en tuberías de diámetros pequeños a los ocurridos en diámetros grandes.

¹ Este trabajo no aborda los procesos de cambio de fase, ni tampoco las interacciones entre fases en el régimen de flujo anular.

Otros autores han establecido distintos mecanismos de interacción para la coalescencia y para la desintegración, casi todos ellos establecen un modelo general indicado por una tasa de generación/desintegración y una eficiencia. En general, todos los modelos de coalescencia siguen al modelo propuesto por Prince y colaboradores [Prince1990], el cual considera que la coalescencia entre las burbujas i y j es igual a la tasa de colisión θ_{ij} multiplicada por un coeficiente de eficiencia de colisión λ_{ij} .

$$C = \theta_{ij} \lambda_{ij} \quad (2.24)$$

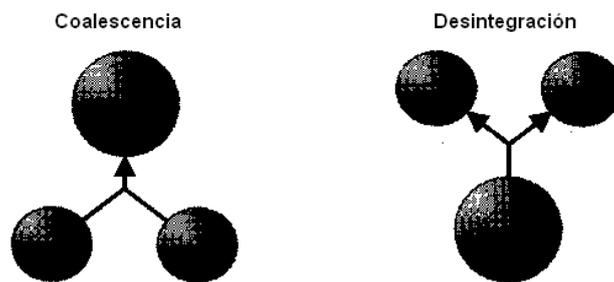


Figura 2.1 Mecanismos de interacción entre burbujas

a) Mecanismos de Coalescencia

El término coalescencia hace referencia a la generación de nuevas burbujas debido a la unión de burbujas existentes. Para flujo bifásico agua-aire adiabático se han observado diversos mecanismos de coalescencia, algunos de los más importantes son la coalescencia debida a la inclusión de burbujas que siguen la estela de burbujas precedentes, la coalescencia debida al impacto turbulento, y coalescencia debida al choque de dos burbujas con velocidades diferentes.

Coalescencia por impacto turbulento

Este mecanismo puede ser descrito por dos procesos consecutivos que consisten en el drenaje de la película fluida que separa a las burbujas, la segunda es la ruptura de esta película. La velocidad de aproximación de las burbujas es un parámetro muy importante ya que si ésta es muy grande probablemente la película que separa a las burbujas no será drenada a tiempo y las burbujas rebotaran sin coalescencia alguna [Kirkpatrick1974]. Prince et. al. [Prince1990] modeló este mecanismo mediante una tasa de colisiones entre burbujas y una eficiencia de la coalescencia. La eficiencia, λ_{ij} , fue determinada en función del tiempo requerido para que se complete la coalescencia (t_{ij}) y el tiempo de contacto en el régimen turbulento (τ_{ij}).

$$\lambda_{ij} = e^{\frac{t_{ij}}{\tau_{ij}}} \quad (2.25)$$

El tiempo requerido para que se complete la coalescencia (t_{ij}) es determinado por el grosor inicial de la película y el grosor crítico de la película para que se rompa. El tiempo de contacto depende del radio de la burbuja y la disipación de la energía de turbulencia.

Este modelo, basado en la teoría del drenaje de película es uno de muchos, sin embargo no es la única pauta para analizar este tipo de interacción. Mediante una concepción diferente [Stewart1995] se ha establecido que la coalescencia es binaria y ocurre en burbujas de tamaño semejante, además la coalescencia se desarrolla en tiempos muy cortos por lo que la penetración en la interfase es inmediata.

Un tercer criterio de análisis es representado por el formalismo de la teoría de drenaje pero desde un punto de vista similar al de Stewart [Kim1999] que consiste en asumir que la interacción entre burbujas es binaria y el tamaño puede ser igual o muy semejante, en donde una frecuencia de colisión es proporcional a la fluctuación turbulenta de la velocidad u_t y una fracción de huecos máxima que se requiere para compactar el espacio ocupado por el volumen de control. Esta frecuencia de colisión, el número de burbujas y una probabilidad de choque permiten hallar una tasa de colisiones por unidad de volumen que produce coalescencia:

$$R_{RC} \propto f_{RC} n P_{RC} = \frac{u_t}{D_b} \alpha^{1/3} \left[\frac{\alpha_{\max}^{1/3}}{\alpha_{\max}^{1/3} - \alpha^{1/3}} \right] n \left(\frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \right)^{2/3} \quad (2.26)$$

Consideró también la existencia de una longitud media como límite para que ocurra la coalescencia y agregó un factor de eficiencia de coalescencia debido a que no todas las burbujas coalescen entre sí. Estas dos acciones introducen factores experimentales que se ajustan en función de la información experimental disponible.

$$R_{RC} \propto n^2 D_b^2 u_t \left[\frac{C_{RC}}{\alpha_{\max}^{1/3} (\alpha_{\max}^{1/3} - \alpha^{1/3})} \right] \left(1 - e^{-C \frac{\alpha^{1/3} \alpha_{\max}^{1/3}}{\alpha_{\max}^{1/3} (\alpha_{\max}^{1/3} - \alpha^{1/3})}} \right) \quad (2.27)$$

Programas de cálculo y simulación emplean un modelo de coalescencia expresado en términos de una tasa de colisión y una eficiencia de coalescencia, este modelo mixto fue desarrollado por Prince et. al. [Prince1990]. Hibiki y colaboradores [Hibiki2001b] reportan en su trabajo que en tubos de diámetro relativamente pequeño el mecanismo de coalescencia por impacto turbulento tiene poca importancia, no así la coalescencia debida a la inclusión de burbujas que siguen la estela de burbujas precedentes

Coalescencia debida a la inclusión de burbujas que siguen la estela de burbujas precedentes

Este mecanismo aparece cuando una burbuja provoca una depresión en la cola o estela que genera la succión de burbujas de menor tamaño. Existe una longitud crítica a partir de la cual ocurre el proceso de succión antes descrito [Nevers1977]. Stewart en su trabajo observo que esta interacción podía ser binaria, pudiendo incluir un conjunto de burbujas con valores mas ajustados de esta distancia crítica, otros autores han delimitado aún más esta distancia [Tsuchiya1996].

Existe por otro lado una formulación distinta. Suponiendo que la burbuja posee forma esférica y mediante el cálculo de la estela que dicha esfera ocasionaría, una tasa de colisiones dependiente de la velocidad relativa entre burbujas es determinada [Kim1999].

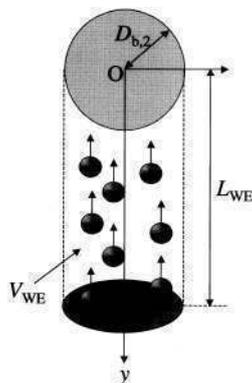


Figura 2.2 Coalescencia debida a succión de burbujas por la estela de burbuja precedente

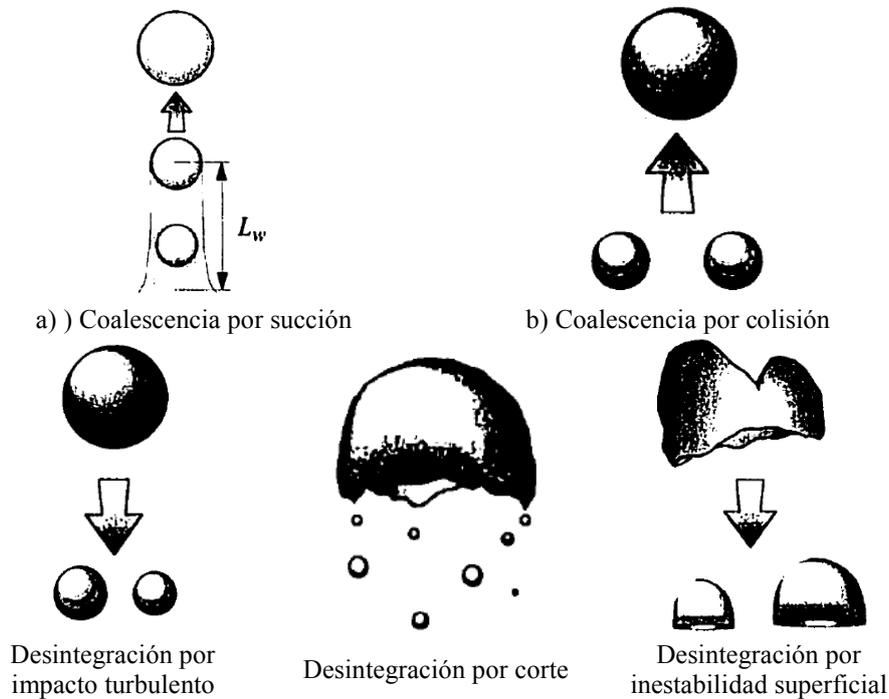


Figura 2.3 Mecanismos de desintegración

b) Mecanismos de desintegración

La desintegración de burbujas repercute en un incremento de la concentración de área interfacial y en consecuencia incrementa las tasas de transferencia entre fases del sistema. De todos los mecanismos que han sido identificados, la desintegración debida al impacto turbulento es una de las más estudiadas.

Existen diversos modelos que contemplan una división binaria en la cual las burbujas producto de la división poseen el mismo tamaño [Prince1990], algunos criterios más exactos consideran burbujas de tamaños distintos [Wang2003]. Cuando las burbujas pertenecen al grupo dos existen otros mecanismos de interacción como lo es la desintegración debida a la inestabilidad de superficie y la desintegración de burbujas grandes debida al desprendimiento de burbujas pequeñas.

Desintegración debida al impacto turbulento

Cuando la inercia de los remolinos turbulentos supera la fuerza de tensión superficial de la interfase, la burbuja se rompe. Se ha definido un número de Weber crítico [Hinze1955] por debajo del cual las burbujas no se romperían independientemente de la intensidad del impacto del remolino u otra fuerza exterior.

$$We_{cr} = \frac{\rho_c u_{tcr} D_b}{\sigma} \quad (2.28)$$

Donde u_{tcr} es la velocidad de fluctuación turbulenta crítica promediada espacialmente sobre una distancia D_b . Estudios posteriores propusieron una frecuencia de desintegración dependiente del tamaño de partículas, tensión superficial, viscosidad de ambas fases, fracción de huecos y la tasa de energía disipada [Coula1977]. Esta frecuencia de desintegración parte de la suposición de que la energía cinética turbulenta transmitida por un impacto turbulento es como mínimo la energía superficial de la burbuja. De manera similar que Stewart y Kim, fue propuesto un factor de eficiencia que considera aquellos remolinos con una energía cinética turbulenta superior a la que necesita para romper la burbuja, dicho factor esta definido como:

$$f(u) = e^{-\left(\frac{u_{ej}}{u_{ted}}\right)^2} \quad (2.29)$$

Posteriormente una tasa de desintegración fue formulada [Prince1990] considerando burbujas de cualquier tamaño y remolinos de cualquier escala existente en el medio. Otro grupo de investigación llevo a modelos parecidos desde una concepción binaria de la ruptura [Kim1999] la cual puede ser no válida para muchos casos ya que una ruptura generalmente generará una distribución de burbujas con tamaños distintos que pueden ser descritos mediante un modelo estadístico para determinar funciones de densidad de probabilidad de las burbujas producidas [Martinez-Bazan1999a].

La aparición de una distribución de burbujas de diferentes tamaños complica aún más el problema ya que aparecerán todos los posibles mecanismos de interacción de las nuevas burbujas.

Los códigos CFD emplean un modelo de desintegración de burbujas que predice la tasa desintegración por unidad de volumen [Lou1996] y no es necesario determinar a priori la función densidad de probabilidad del número de las burbujas hijas como lo propone Martínez-Bazan. Las tasa de desintegración de burbujas de tamaño j en burbujas de tamaño i es expresada como:

$$R_{TI}^{ij} = 0.923 f_B (1 - \alpha_d) \left(\frac{\varepsilon_c}{d_i^2} \right)^{1/3} \int_{\xi_{\min}}^1 \left(\frac{(1 + \xi)^2}{\xi^{4/3}} e^{-\frac{12\sigma(f_{BV}^{2/3} + (1 - f_{BV})^{2/3} - 1)}{\beta \rho_c \varepsilon_c^{2/3} d_i^{5/3} \xi^{4/3}}} \right) d\xi \quad (2.30)$$

Donde f_B es un factor de calibración, ε_c es la tasa de disipación turbulenta. ξ es una magnitud adimensional definida en función del tamaño de remolino λ que llega a la burbuja. La función f_{BV} es el cociente de la masa de la burbuja hija y la burbuja padre. Las otras magnitudes se calculan con las expresiones siguientes.

$$\xi = \frac{\lambda}{d_i} \quad (2.31)$$

$$\xi_{\min} = 11.4 \frac{\eta}{d_i} \quad (2.32)$$

$$\eta = \sqrt[4]{\frac{v_c^3}{\varepsilon_c}} \quad (2.33)$$

2.3 Base de datos experimentales

En la literatura existen diferentes trabajos experimentales realizados que se proponen obtener medidas físicas de los principales parámetros de flujo bifásico. Dichos trabajos se han realizado en gran variedad de arreglos experimentales cuyos aspectos más importantes son la geometría y las condiciones de flujo.

En este sentido han sido diseñadas instalaciones experimentales que emplean geometrías rectangulares [Zenit2001][Kim2002][Prasser2001], geometrías cilíndricas de diferentes tamaños que podrían catalogarse como diámetros pequeños e inferiores a 25mm [Hazuku2007], diámetros medios dentro del rango 50-100mm de diámetro [Hibiki1998] [Sun2002], diámetros grandes superiores a 100mm [Garnier2002][Prasser2008], y canales anulares cilíndricos [Hibiki2003b][Jeong2008][Juliá2008]. Existen también arreglos experimentales en los cuales la dirección de flujo se desarrolla horizontalmente [Ujang2006], verticalmente en la dirección ascendente [Hibiki2001], vertical en la dirección descendente [Sun2004], en contra-corriente orientado verticalmente [Hasan1994] y con cambios de dirección horizontal-Vertical [Kim2007].

Capítulo 2. Antecedentes

Existen también trabajos experimentales en donde son comparados distintos procesos de generación de burbujas [Hibiki2001], y en la modificación de las propiedades físicas de una o ambas fases [McNeil2003].

La instalación experimental construida para este estudio se describe en el capítulo cuatro, sin embargo se mencionaran algunas características importantes con la finalidad de situarla frente a otras instalaciones similares. La instalación experimental empleada en este trabajo posee una altura de 3 metros y un diámetro interno de 52 mm. Permite la creación de flujos bifásicos mediante un medio poroso de 20 micrómetros de porosidad media. La máxima velocidad superficial de la fase líquida que se ha probado es de 7.5m/s, sin embargo por límites de seguridad la velocidad superficial del líquido no excede los 5.0m/s. La instalación no dispone de dispositivos que regulen la temperatura del líquido almacenado por lo cual debe vigilarse que la temperatura de la fase líquida no supere 30°C.

La máxima velocidad de la fase gaseosa que se ha ensayado hasta el momento es cercana a los 4m/s, la capacidad del compresor hace posible exceder ese valor pero hasta el momento no se ha ensayado ninguna condición mas allá de ésta. Se ha instalado también un separador de fases en la parte superior de la columna, este separador se encuentra abierto a la atmósfera.

La tabla 2.1 muestra algunos datos acerca de instalaciones de características similares empleadas por otros autores. Se han seleccionado instalaciones cuyas características permiten comparar los resultados obtenidos hasta el momento, algunas de estas características son sección de ensayo cilíndrica con diámetros cercanos al empleado en este trabajo (40-60mm), desarrollo del flujo en la dirección vertical ascendente, flujo adiabático a presión atmosférica. La última referencia se ha añadido dada su importancia y la información que mediante su empleo se ha generado.

La instalación PUMA posee características similares a las que poseen otras instalaciones, las ventajas que posee sobre las demás son debidas principalmente a la instrumentación ya que posee un sistema de anemometría láser muy potente y con gran precisión dimensional y temporal, un equipo de visión artificial con una gran velocidad de adquisición de imagen, sistemas precisos y automatizados de posicionamiento de las sondas de conductividad y del sistema de anemometría láser. Estas características son descritas de manera general en la siguiente sección y con mayor profundidad en los siguientes capítulos.

2.3 Base de datos experimentales

2.1 Instalaciones experimentales similares a la instalación PUMA

Investigador	L [mm] / D [mm]	z [mm] / D [mm]	j_g [m/s]	j_r [m/s]	Numero de datos	Técnica experimental	Generación de mezcla bifásica
[Hibiki1998]	3658 / 50.8	2, 32, 62	0.017-0.093	0.6-1.3	9	Sonda 2 puntas AHC	Tubo capilar
[Hibiki2001]	3061 / 50.8	6, 30, 53	0.0275-3.9	0.491-5.0	22	Sonda 2 puntas AHC	Sparger
[Hogsett1997]	3240 / 50.8	2, 32, 62	0.61-1.3	0.039-0.147	54	Sonda 2 puntas AHC	Tubo capilar
[Dongjan2005]	2000 / 40	43	0.442	0.011-0.090	4	Sonda 2 Puntas Imagen Dig.	Sparger
PUMA	3180 / 52	2, 36, 56	0.03-2.17	0.5-5.0	50	Sonda 4 puntas AHC	Sparger
Gnoyke2003	7000 / 50	1, 6, 16, 33	0.1, 0.2	1	4	Mesh sensor AHC	Orificio calibrados
MT-Loop [Prasser2008a]	5800 / 51.2	59.2	0.004-0.037	0.405- 1.02	9	Mesh sensor	Sparger
TOPFLOW [Prasser2008a]	9100 / 194	47	0.04 - 8.0	0.04 - 1.6	9	Mesh sensor	Sparger

2.4 Técnicas de medida en flujo bifásico

2.4.1 Anemometría de hilo caliente

Es una técnica invasiva de medida puntual. Se emplea para determinar la velocidad del fluido y del gas, también es posible determinar la fracción de huecos y la velocidad de las burbujas en un punto. Consiste en un hilo conductor de diámetro muy pequeño menor a 1 mm suspendido entre dos agujas conductoras. A través de las agujas y el hilo conductor circula una intensidad de corriente eléctrica, cuando un fluido pasa a través del hilo se produce un cambio en su resistencia eléctrica y con ello cambia cantidad de energía eléctrica que demanda. Con ayuda de un circuito eléctrico la intensidad de corriente que circula por el hilo puede modificarse para mantener constante la temperatura. La señal eléctrica contiene información de la interacción del fluido con el hilo sensible y mediante procesado de la señal eléctrica obtenida, información sobre la velocidad del fluido o de la fracción de huecos es accesible. La figura 2.4 muestra la interacción de una burbuja con este sistema de medida: cuando una burbuja pasa a través del hilo la conductividad del medio baja y se produce una caída de voltaje.

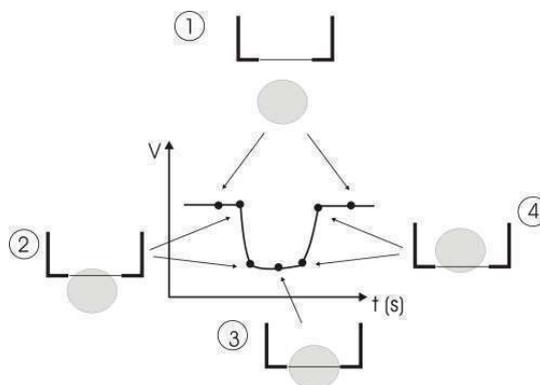


Figura 2.4 Variación del voltaje en función del paso de una burbuja

Cuando existen un gran número de burbujas con distintos tamaños y con movimientos tridimensionales la interpretación de la señal se complica. Existen una serie de técnicas desarrolladas para determinar la fracción de huecos en un punto [Trabold1994] [Carvalho1992] [Jones1978].

2.4 Técnicas de medida en flujo bifásico

La mayoría de ellos son muy simples, se basan en la determinación de una tensión de voltaje umbral que discrimina las fases gaseosa y líquida, luego se divide el tiempo que corresponde a las muestras que se han determinado y que corresponden al gas respecto al tiempo total de muestreo, de este modo se puede proponer un valor para la fracción de huecos local. La parte más importante en el procesado de la señal suele ser la elección de un valor umbral del voltaje para interpretar el cambio efectivo de fase [Trabold1997], la cual se puede realizar utilizando un histograma de la tensión de las muestras adquiridas. Farrar [Farrar1995] propuso un algoritmo para la detección y medida basado en varios puntos característicos en la señal eléctrica. Se basa en la detección de los puntos en los que la burbuja entra en contacto con el anemómetro y el punto en el cual la parte final de la burbuja se despende del hilo caliente, así como en los puntos en los que la señal se recupera, incluso tiene en cuenta el efecto del líquido que se mueve alrededor de la burbuja.

Carvalho et al. [Carvalho1992] introduce en estas técnicas el tiempo de transición entre una fase y otra con el objetivo de conseguir un sistema más preciso de contabilización de la fase líquida y lo hace en función del cambio de signo de la pendiente en el voltaje en la representación de las muestras. Con todo ello se puede obtener una medida de la fracción de huecos promedio, así como de la frecuencia de las burbujas.

Es posible medir la velocidad de las burbujas mediante el uso de dos sondas de un hilo y así determinar la velocidad interfacial [Kirouac1999]. Con base en una correlación cruzada entre los voltajes de ambas sondas, es posible determinar el tiempo más probable que tarda una burbuja en recorrer el espacio entre ambas sondas, distancia del orden del milímetro, con lo que se sabe la velocidad interfacial.

Cuando se estudian burbujas grandes con el anemómetro de hilo caliente, estas son perforadas por el anemómetro, en cambio cuando las burbujas son muy pequeñas del orden de 1 o 2 mm éstas no suelen ser perforadas, sino que colisionan con el hilo caliente y son desviadas. Estas colisiones también pueden ser contabilizadas, ya que en su paso por el anemómetro existe una variación en la señal percibida, la cual deberá ser interpretada de forma correcta, lo que no resulta sencillo. Tal como ya se ha comentado, la interpretación de la señal obtenida suele ser el principal problema que presenta el uso de esta técnica. Sí el flujo es turbulento el análisis se complica ya que se puede confundir la señal de las burbujas con las oscilaciones típicas del flujo turbulento [Larue2001].

Capítulo 2. Antecedentes

Laure de Tournemine et al. [Laure2001] han realizado un experimento que les permite calcular la velocidad del fluido en un flujo turbulento en presencia de una fracción de huecos significativamente alta, sí como determinar la velocidad del fluido alrededor de las burbujas. Uno de los inconvenientes de esta técnica es la necesidad de una pequeña velocidad del fluido a partir de la cual es posible el inicio de la adquisición de datos, en el caso de aplicarla a procesos con velocidades demasiado bajas muy probablemente los valores obtenidos sean erróneo, además el fluido debe estar muy limpio para impedir que el hilo caliente se rompa o se ‘ensucie’ perdiendo toda calibración. A esto hay que añadir que el anemómetro mide de forma preferente la velocidad perpendicular a hilo caliente, si situamos el anemómetro paralelo a la velocidad que deseamos medir, obtenemos sólo un 20 % de la velocidad que deseamos medir [Zenit2001]. Cuando la presión y caudal másico aumenta, los problemas con la señal aumentan apareciendo un gran ruido asociado a la señal, debido entre otras cosas al aumento de la transferencia de calor por convección asociada. Podemos deducir que se trata de una técnica útil, en cuanto a la operación y configuración del equipo, pero bastante problemática en la extracción de resultados.

Kirouac et al. [Kirouac1999] y Trabold et al. [Trabold1998] han utilizado esta técnica entre otras para la medida de flujo en burbujas y han determinado que éste tipo de medias proporcionan resultados muy fiables en la medida de la distribución, tamaño y velocidad de las burbujas, comparando las medidas obtenidas con técnicas como la anemometría láser o la densimetría Gamma.

Zenit et al., [Zenit2001] ha empleado este sensor para la medida de la velocidad del fluido y la tasa de interacción de las burbujas en una nube de burbujas. Utiliza una cámara de alta velocidad para analizar el comportamiento del medio en su interacción con el anemómetro fijando así el umbral de voltaje que le permita discriminar la señal obtenida. Garnier [Garnier2001] y Salesse [Salesse2002] utilizan anemómetros de hilo caliente en sus estudios para caracterizar flujos con altas fracciones de huecos, así como velocidades de burbujas y diámetros. Recientemente, Boyer y sus colaboradores, [Boyer2002], cita esta técnica entre las utilizadas en la caracterización de reactores químicos. Hibiki y colaboradores [Hibiki1998] [Hibiki2001] han generado bases de datos experimentales de los parámetros locales de flujo mas importantes empleando anemometría de hilo caliente en conjunto con la sonda de conductividad, descrita mas adelante.

2.4.2 Técnicas Basadas en Ultrasonidos

Las técnicas acústicas son ampliamente utilizadas en la medición de las principales características de flujo debido a que las burbujas se acoplan con facilidad a las fluctuaciones de presión originadas por las ondas sonoras, este fenómeno es debido tanto por al gran desacoplamiento de impedancias en la zona de interfase líquido-gas, como a los diferentes coeficientes de compresibilidad entre ambas fases. De esta forma, es posible realizar la medida de caudales de fluido, comprobación de la existencia de cavitación en el interior de tuberías, medidas de diámetros de burbujas, etc.

Existen diferentes métodos acústicos para determinar el diámetro de burbuja. En primer lugar, existen métodos pasivos como son la detección de la dispersión lineal trasera de una burbuja en resonancia, técnicas basadas en el efecto Doppler, generación de segundos armónicos, etc. [Fairbank1977] [Nishii1972] [Miller1981]. El coste de estos equipos es relativamente bajo, sin embargo tienen limitaciones importantes como son el acoplamiento con diferentes fuentes externas de ruido o la baja resolución de las medidas obtenidas. Estos factores imposibilitan su utilización en la medida de diámetros de burbujas en nubes densas con un gran número de burbujas.

Otro tipo de técnicas acústicas son las denominadas activas. De ellas la técnica más precisa se basa en la detección de los subarmónicos de la respuesta acústica de la burbuja sometida a dos campos acústicos incidentes. Esta técnica fue desarrollada por Newhouse y Shankar a mediados de los años 80 [Newhouse1984]. En ella se utilizan dos fuentes externas de ultrasonidos, una de frecuencia constante de al menos 1 MHz, denominada frecuencia imagen (w_i) y otra que es capaz de barrer un rango de frecuencias de 1 a 10 KHz (para un rango de diámetros de burbujas de 1 a 5 mm), denominada frecuencia de bombeo (w_b). El objetivo del emisor de la frecuencia imagen es inducir una vibración de muy alta frecuencia a la burbuja de forma que ésta quede aislada de posibles fuentes externas de vibraciones. Una vez que la burbuja está aislada, es excitada con la frecuencia de bombeo para determinar su frecuencia de resonancia y, de esta forma, su diámetro. La respuesta de la burbuja estará en el rango de MHz, pero la única información importante son los subarmónicos provocados por la señal de bombeo. Por lo tanto, aunque la señal es recibida en MHz, para convertir esta señal al rango de los KHz se realiza un proceso de heterodinaje que consiste en la combinación de dos ondas de frecuencia similar pero variable creando otra onda con frecuencia igual a la diferencia entre las ondas originales.

Capítulo 2. Antecedentes

Mediante este sistema es posible realizar medidas en nubes densas de burbujas y, realizando un barrido de frecuencias en la señal de bombeo, pueden obtenerse histogramas de diámetros de las mismas [Phelps1996] [Phelps1997] [Leighton1997] [Leighton1998]. Sin embargo, la información que proporciona es global, es decir, está referida al conjunto de la nube de burbujas, por lo que no permite obtener información local de cada zona. Además es un sistema experimental de un coste considerable, debido principalmente al emisor necesario para el sistema de bombeo. El equipamiento necesario para realizar los experimentos es el siguiente y se muestra esquemáticamente un sistema experimental en la figura 2.5:

1) Sistema de emisión de señal imagen: Generador de ultrasonidos de 1 MHz, amplificador de señal y transductor subacuático.

2) Sistema de emisión de señal de bombeo: Generador de ultrasonidos de un rango de 1 KHz a 10 KHz, amplificador de señal y transductor subacuático.

3) Sistema de recepción de señal: Transductor subacuático centrado en 1 MHz, sistema de heterodinaje de 1 MHz a KHz y sistema de adquisición de señales:

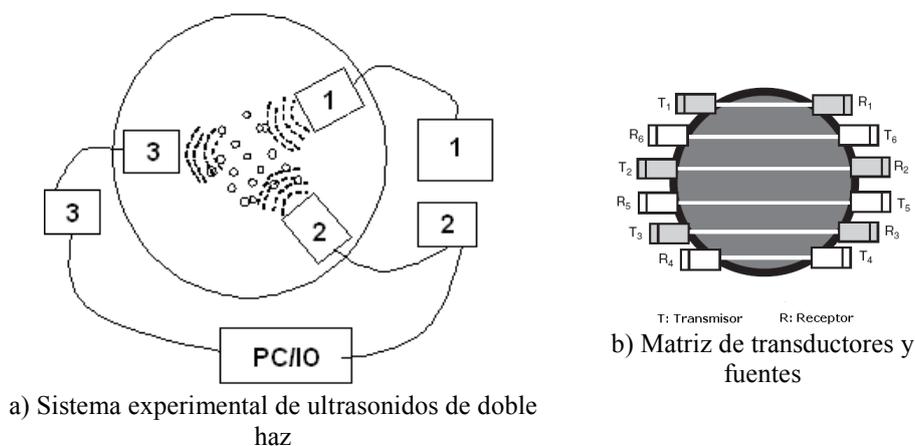


Figura 2.5. Ultrasonido en flujo bifásico

2.4.3 Técnicas Basadas en la Visualización

Las técnicas de visualización son ampliamente utilizadas en el estudio de diferentes fenómenos asociados al flujo bifásico. En particular, es posible estudiar los procesos de ruptura, y coalescencia de las burbujas presentes en un fluido mediante la visualización de éstas. Es posible dividir estas técnicas en dos grandes apartados.

2.4 Técnicas de medida en flujo bifásico

Las *técnicas de visualización directa* son las más utilizadas y en ellas, usualmente, se utilizan cámaras que incorporan dispositivos de carga acoplada (CCD) y sistemas de iluminación basados en fuentes de luz de estado sólido y estroboscópicas. Las características técnicas de las cámaras CCD deben ser tales que sea posible obtener una alta resolución (con un mínimo de 600 x 600 píxeles debido al pequeño diámetro de las burbujas a estudiar), velocidades de obturación cortas (del orden de los microsegundos debido a que es necesario captar imágenes nítidas de objetos en movimiento) y, finalmente tener la capacidad de adquirir un número elevado de imágenes por segundo (típicamente de 30 a 100 imágenes por segundo) debido a que en numerosas aplicaciones es necesario obtener información sobre la trayectoria que han seguido las burbujas. Algunas aplicaciones involucran numerosos estudios sobre el proceso de formación de las burbujas [Manase1998], medida de diámetros de burbujas [Otake1977] [Tsoa1997] [Snabre1998], y el estudio de procesos de coalescencia entre ellas [Tse1998].

Además, las técnicas de visualización directa, suelen utilizarse como complemento a otras técnicas experimentales como la anemometría de hilo caliente, sondas de conductividad, etc. En cuanto a las limitaciones que presentan este tipo de técnicas, la principal radica en que no es posible su aplicación en flujos bifásicos con nubes densas de burbujas, ya que en este caso las burbujas más próximas a la CCD se solapan con las más alejadas, imposibilitando su visualización. Además, es necesario realizar un procesamiento digital de las imágenes obtenidas con el fin de obtener resultados cuantitativos y la precisión de éstos vendrá dada tanto por la calidad de las imágenes obtenidas como por el tipo de procesamiento digital realizado. Típicamente, la precisión de los resultados obtenidos es del 10% [Tsoa1997]. En la siguiente figura se muestra el esquema simplificado de un sistema de visualización para flujo bifásico.

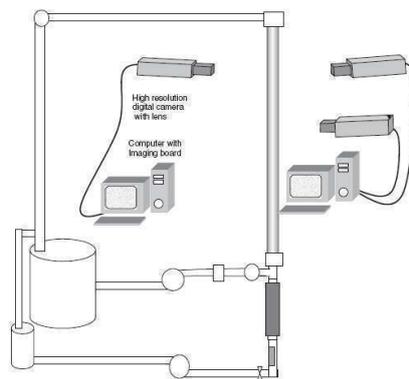


Figura 2.6 Esquema básico de sistema de visualización

Las *técnicas de visualización avanzadas* son técnicas experimentales más complejas, en las que se suelen utilizar como fuente de iluminación sistemas láser. De esta forma es posible realizar estudios tomográficos de nubes de burbujas y solucionar, al menos en parte, los problemas asociados a las medidas en flujos bifásicos con una alta densidad de burbujas.

Dentro de este bloque, las técnicas más extendidas son las de *Velocimetría por Imágenes de Partículas* (PIV) que son técnicas experimentales muy costosas pero que proporcionan campos extensos de velocidades del flujo [Lindken2002] [Funfschilling2001]. Por otra parte, existen técnicas más simples, basadas en principios de interferometría, que permiten la medida de diámetros de burbujas con una gran precisión [Kawaguchi2001].

2.4.4 Técnicas Ópticas

a) Anemometría Láser

La Anemometría Láser de efecto Doppler (LDA) es una técnica óptica no intrusiva para la medida local de velocidad y distribución de turbulencia en un flujo de gas o líquido. Su funcionamiento no intrusivo y la sensibilidad direccional lo hacen muy conveniente para aplicaciones con flujo en contracorriente, flujos con reacciones químicas, medios de alta temperatura y maquinaria en rotación donde sensores físicos son difícilmente o imposible de usar. Esta técnica fue desarrollada por Yeh y Cummins [Yeh1964] y sus primeras aplicaciones experimentales estuvieron relacionadas con las medidas de la distribución de velocidades en flujos [Foreman1965], [Penney1969], [Jackson1970].

Esta técnica de medida basa su funcionamiento en el efecto Doppler. Éste consiste en la variación de la longitud de onda de cualquier onda emitida o recibida por un objeto en movimiento. Este fenómeno se debe al cambio de frecuencia de una onda (luz o sonido) causado por el movimiento relativo entre una fuente de emisión y un observador: cuando la fuente se aproxima al observador, la frecuencia que el observador escucha u observa es mas alta que la frecuencia que el observador percibiría si se moviera junto con la fuente. Si el objeto esta alejándose del observador, éste percibirá una frecuencia mas baja.

Una manifestación del efecto Doppler es el hecho de que ondas reflejadas por un objeto poseen un cambio en su frecuencia cuando el objeto se mueve con respecto a la fuente de onda.

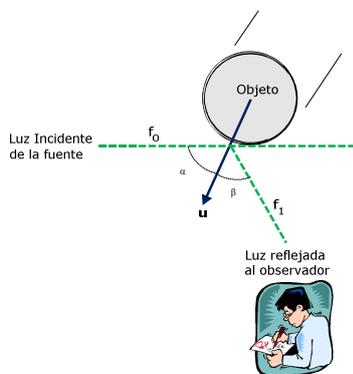


Figura 2.7 Efecto Doppler

La figura 2.7 muestra el efecto Doppler. La fuente emite una onda con velocidad c y frecuencia f_0 la cual es reflejada en todas las direcciones por el objeto moviéndose con velocidad u ($u \ll c$). La frecuencia de la señal reflejada f_1 que el observador percibe y que ésta estático respecto a la fuente esta definida por la ecuación 1.

$$f_1 = f_0 \left(1 + \frac{u}{c} (\cos \alpha + \cos \beta) \right) \quad (2.34)$$

Si la frecuencia de la seña reflejada es conocida dada una seña de la fuente con frecuencia y velocidad determinadas, la velocidad del objeto puede ser calculada.

La aplicación de éste principio en la anemometría láser es descrito a continuación. Un haz luminoso procedente de una fuente láser es dividido en dos de igual intensidad mediante un dispositivo óptico. Una celda de Bragg es frecuentemente usada como divisor de haz, consta de un cristal de vidrio con un cristal piezo-vibrante adherido. La vibración genera ondas acústicas actuando como una rejilla óptica, la salida de la celda de Bragg son dos ases de igual intensidad con frecuencias f_0 y f_{shift} . Estas están enfocadas dentro de fibras ópticas llevándolos a la sonda de prueba

A continuación son focalizados en un punto mediante una lente convergente formándose un volumen de control de muy pequeñas dimensiones, figura 2.8, típicamente de 0.1mm^3 . La intensidad de la luz es modulada debido a la interferencia entre los ases de láser, esto produce planos paralelos de alta intensidad de luz llamadas franjas. La distancia de la franja df es definida por la longitud de onda y al ángulo entre haces:

$$df = \frac{\lambda}{2\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2.35)$$

En el interior de este volumen de control se formarán una serie de franjas interferenciales que consiste en zonas de brillo y oscuridad alternadamente. El espaciamiento de la franja, d_f , es la distancia entre las zonas brillantes y oscuras. La velocidad de una partícula que atraviese este volumen con una dirección perpendicular a las franjas puede ser obtenida a partir de la frecuencia de las fluctuaciones de la radiación láser dispersada por la partícula y recibida por un fotodetector, siempre y cuando sea conocido el valor del espaciado entre las franjas.

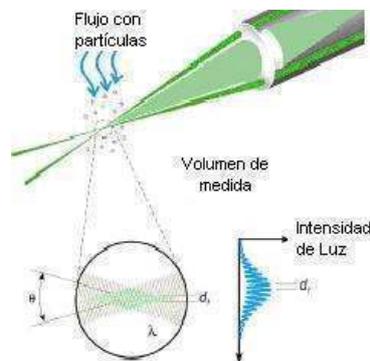


Figura 2.8 Volumen de medida

El foto-detector convierte la intensidad de la luz fluctuante en una señal eléctrica. Las explosiones Doppler son filtradas y amplificadas en el procesador de señal la cual determina el f_D para cada partícula, a menudo por análisis de frecuencia usando el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier. El espaciamiento de la franja d_f proporciona la información sobre la distancia recorrida por la partícula. La frecuencia Doppler f_D proporciona información acerca del tiempo: $t=1/f_D$. Dado que la velocidad es igual a la distancia dividida por el tiempo, la expresión para la velocidad entonces se convierte en el producto $d_f \cdot f_D$.

Dirección de flujo

El cambio de frecuencia obtenido por la celda de Bragg hace que el patrón de franja se mueva a una velocidad constante. Las partículas que no se están moviendo generaran una señal del cambio de frecuencia f_{shift} .

2.4 Técnicas de medida en flujo bifásico

Las velocidades u_{pos} y u_{neg} generaran frecuencia de señales f_{pos} y f_{neg} respectivamente. Sistemas LDA sin shift frecuencia no pueden distinguir la dirección de flujo ni tampoco puede medir velocidades nulas.

Para realizar medidas de velocidades de flujos es necesario dopar el fluido con partículas que deben tener dos características fundamentales: deben ser capaces de seguir el movimiento del fluido y tener el tamaño suficiente como para ser detectadas por el sistema de medida. Cada partícula pasa reflejando luz proporcional a la intensidad local de luz.

Cuando ondas de igual amplitud y frecuencia con valores muy cercanos entre si son superpuestas, la amplitud de la señal resultante presenta caídas y levantamientos periódicos y su frecuencia es la mitad de la diferencia de las frecuencias de las señales originales. Este tipo de modulación se llama golpeo o *beat*.

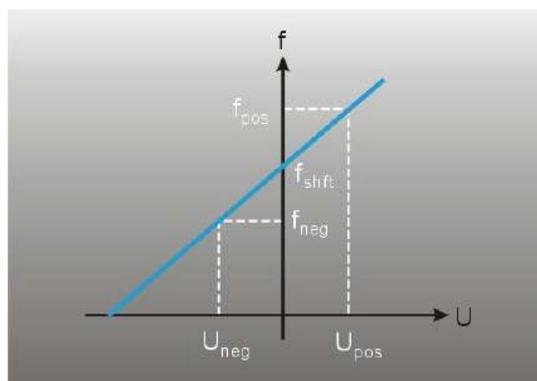


Figura 2.9 Dirección de flujo

Empleo de anemometría láser en flujo bifásico

Se emplea la técnica de LDA para realizar medidas de velocidades en flujos bifásicos. Es necesario plantear si el objetivo es realizar medidas de la velocidad de la fase líquida que rodea a las burbujas o medidas de la velocidad de las mismas. En el primer caso, será necesario dopar el líquido con partículas, usualmente esferas de plástico de muy pequeño diámetro ($10\mu\text{m}$) y recubiertas de una capa metálica. De esta forma, es posible obtener tasas de adquisición de datos de varios KHz [Martinez-Bazan1999b], [Martinez-Bazan1999a], [Mudde1997], [Sheng1991].

Capítulo 2. Antecedentes

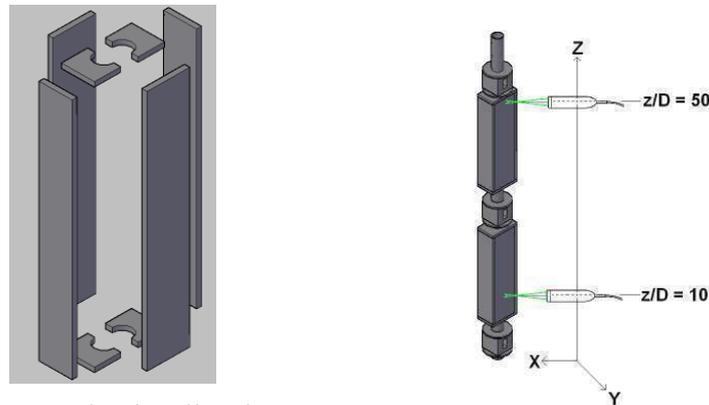
En el segundo caso, no es necesario utilizar sustancia dopante alguna, ya que la misma gota de gas actúa como partícula. Utilizando dos sistemas LDA es posible medir de forma simultánea las velocidades de ambas fases del fluido [Vasallo1999].

No será posible realizar medidas en flujos con una alta concentración de burbujas. Esto es debido a que cuando una burbuja situada entre la sonda láser de medida y el volumen de control atraviese uno de los haces láser, lo obturará en parte y, por lo tanto, no será posible obtener las franjas de interferencia. Típicamente no es posible realizar medidas de LDA en flujos bifásicos con más de un 10% de volumen de gas



Figura 2.10 Empleo del sistema LDA en la instalación

Debe señalarse que fueron empleadas cámaras de visualización cuya finalidad es compensar el índice de refracción debido al cambio del medio fluido. Como lo muestra la figura 2.11.



a) Cámara de visualización

Figura 2.11 Cámaras de visualización en la sección de medida

2.4 Técnicas de medida en flujo bifásico

Las cámaras de visualización consisten en un prisma rectangular instalado sobre la tubería de metacrilato, y en su interior contiene agua de las mismas características del agua empleada como fase líquida en los ensayos realizados.

El Instituto de Ingeniería dispone de un sistema de anemometría Láser Doppler de la firma *Dantec* con el cual es posible realizar medidas de velocidades de partículas en 2 dimensiones. El sistema de emisión-recepción está compuesto por una fuente láser de Ar^+ de la firma *Spectra-Physics* con una potencia total de 8.0 W, un transmisor de fibra óptica modelo 60X41 con 4 acopladores de fibra modelo 60X24 y una sonda de medida en backscattering modelo 60X61 con una distancia focal de 250 mm. La radiación dispersada por las partículas es recibida por dos fotomultiplicadores (uno para cada dimensión) que las convierten en señales eléctricas. El sistema permite realizar medidas de velocidades en dos dimensiones con la misma sonda, utilizando las radiaciones láser en 485 nm y 514 nm de la fuente láser de Ar^+ . El sistema de procesado de las señales recibidas está basado en un autocorrelador modelo 60N10 de la firma *Dantec*. Es posible desplazar el punto de medida mediante un sistema de posicionamiento de tres ejes perpendiculares motorizados de control automático y con una precisión de 0.001 mm. Todo el sistema de medida está controlado por el software *Floware*. En la figura 2.12 se muestra un esquema del sistema LDA disponible.

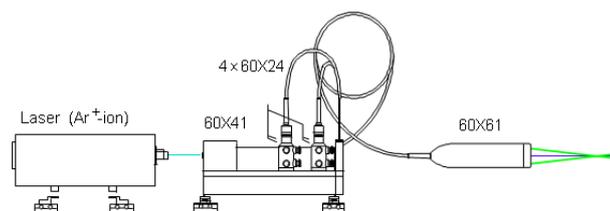


Figura 2.12 Sistema LDA de la firma Dantec

b) Sonda óptica

Es una técnica invasiva que permite la medición local de parámetros de flujo bifásico como son fracción de huecos, velocidad superficial y tamaño de burbuja. Su principio de funcionamiento está basado en la gran diferencia que existe entre el ángulo crítico para la reflexión/refracción entre dos fases distintas, de modo que este ángulo es más grande para interfases vidrio-agua que para la interfase vidrio-aire.

Capítulo 2. Antecedentes

Es posible discriminar el paso de burbujas en un flujo bifásico analizando la respuesta óptica ante el cambio del medio presente en un punto. La figura 2.13 muestra esquemáticamente la estructura de ésta técnica de medida.

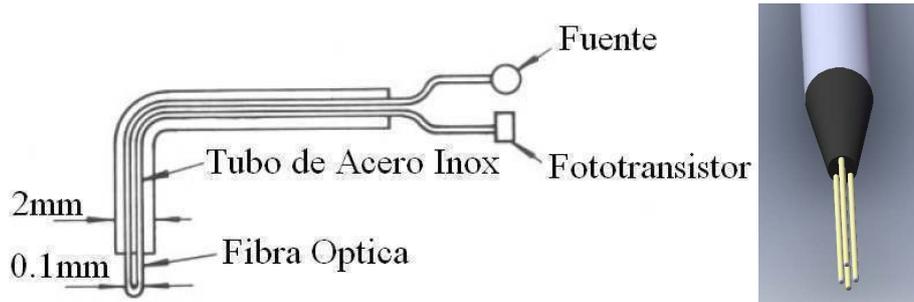


Figura 2.13 Sonda óptica

Esta compuesto por dos o más sensores de fibra óptica instalados en un arreglo geométrico determinado en el que una punta es mas larga que los demás. Una fuente láser (generalmente de 500mW de potencia) suministra luz a la fibra óptica (680nm de longitud de onda) la cual es transmitida hasta el punto de medida en donde, ante la presencia de agua, el haz láser abandona la fibra. El caso contrario sucede en presencia de aire ya que el haz es reflejado y conducido hasta un foto-detector que cambia la señal lumínica por una señal de voltaje. La figura 2.9 muestra la interacción entre la sonda óptica y la fibra óptica, se observan señales con forma escalón cuando la punta de la sonda detecta aire y agua.

A partir de la señal de voltaje se extrae información primaria como fracción de huecos, velocidad interfacial y distribución del número de burbujas, y a partir de esta información es posible obtener medidas experimentales de la concentración de área interfacial y del tamaño de burbuja.

2.4 Técnicas de medida en flujo bifásico

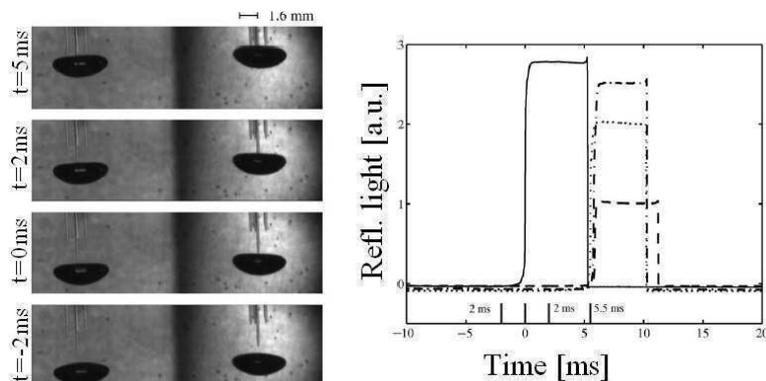


Figura 2.14 Interacción entre sonda óptica y burbuja

Entre las características más importantes se encuentran que no es requerido que los fluidos sean conductores eléctricos, no tiene influencia alguna el líquido sobre su superficie que para las sondas de conductividad eléctrica se llama efecto de remojado (que será detallado en el capítulo 3), puede detectar gotas y posee un tamaño muy reducido de punta llegando a ser de 10 micrómetros. Como algunas desventajas se encuentra el requerir un exhaustivo acondicionamiento de señal, la fabricación es compleja y de elevado costo, no proporciona una medida directa de tamaño de burbuja sino que proporciona medidas de longitud de cuerda y por lo tanto el esquema de procesamiento debe incluir factores de corrección que aporten información acerca del ángulo de ataque de burbuja y así obtener una medida de la velocidad real de la interfase de la burbuja.

Esta técnica de medida ha sido ampliamente utilizada en un gran número de trabajos acerca de la dinámica de burbujas en flujos bifásicos y cavitación [Shen2005] [Xue2008] [Milenković2005] [Milenković2007a] [Milenković2007b]. LeCorre et. al. [LeCorre2002a] realizan la comparación entre ésta técnica de medida y la sonda de conductividad, en ambos casos es crucial realizar un procesamiento de la señal cuidadoso. Algunos de los avances más importantes que en el procesamiento de la señal se han logrado recientemente han contribuido al mejoramiento de ésta técnica de medida y de la sonda de conductividad indirectamente [LeCorre2002b] [Shen2008], la cual es descrita al final de éste capítulo y tratada con detalle en el siguiente.

2.4.5 Técnicas eléctricas

a) Sensor capacitivo

Mide la fracción de volumen de líquidos en aceites y fracciones de huecos en mezclas líquido-gas.

Capítulo 2. Antecedentes

Sí ambas sustancias tienen diferentes permisividades eléctricas esta técnica puede emplearse y aunque su principio de funcionamiento es muy sencillo debe comprenderse por completo la teoría básica para evitar errores en la interpretación de la información. La diferencia entre la permisividad eléctrica de los componentes o fases entre dos platos de capacitancia o electrodos hace la capacitancia entre los dos planos dependa de la concentración de los componentes en los flujos. Sin embargo entre la concentración y la permisividad de una mezcla y la capacitancia en el sensor no es sencilla y depende de la distribución de los componentes en el flujo o del régimen de flujo. Se emplea en flujos homogéneamente mezclados.

Consiste el modelo más sencillo en dos platos paralelos de metal separados por una distancia d . Si los sensores guardados son mantenidos al mismo potencial así como el sensor y eléctricamente aislados, la capacitancia es medida como:

$$C_s = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.36)$$

Donde A es el área de cada electrodo, d la distancia entre electrodos, ϵ_r la permisividad relativa del material entre los platos y ϵ_0 la permisividad en espacio libre. Los electrodos guardados tienen por objetivo eliminar la influencia de los campos de franja o de los efectos de borde de los electrodos serán eliminados.

Si el material entre los dos electrodos consiste en dos componentes con distintas permisividades los volúmenes de éstos pueden ser obtenidos sí la dependencia de permisividad sobre la fracción de componentes es conocida.

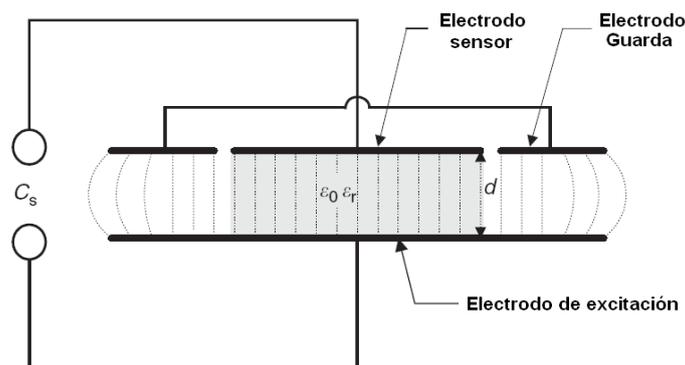


Figura 2.15 Sensor de capacitancia básico

b) Sondas de impedancia y resistivas

Debido a la alta capacidad de respuesta en altas frecuencias de cambio, las técnicas eléctricas son muy atractivas para la medida de los parámetros de flujo bifásico. El principio de funcionamiento está basado en la diferencia de las propiedades eléctricas de las fases gas y líquido.

La admitancia en una mezcla bifásica puede expresarse como:

$$Y_{mix} = G_{mix} + j.\omega.C_{mix} \quad (2.36)$$

$$G_{mix} = \frac{\delta_{mix}}{B} \quad C_{mix} = \frac{\epsilon_{mix}}{B} \quad (2.37)$$

Donde Y es la admitancia (la inversa de la impedancia), G es la conductancia y C es la Capacitancia, siendo δ la frecuencia de excitación, ω es la conductividad y ϵ la capacidad de la mezcla, B es un factor geométrico dependiente del electrodo. Así, en general este tipo de sondas suelen medir la magnitud y la fase de la admitancia, lo que permite determinar las variaciones de la conductividad y capacidad, relacionándolas con la fracción de huecos de la medida.

Dependiendo de la configuración de los electrodos y tierra en la impedancia de las sondas dominará la conductancia (sondas conductivas), la capacitancia (sondas capacitivas) o una configuración de ambas (sondas de admitancia). En general suele ser mejor trabajar a alta frecuencia, [Duncan1993], para forzar el dominio de la capacidad ya que esta depende muy poco de la temperatura del fluido, mientras que la conductividad si lo hace, pero en casos isoterms esto es un tanto irrelevante.

Es de esperar una serie de problemas generales asociado al uso de este tipo de sensores, como son la distorsión de la señal, su fase, efectos electroquímicos, respuestas no lineales debido principalmente al flujo del fluido o problemas asociados al mojado de la sonda o la tensión superficial del fluido. También es de esperar otro tipo de problemas como la poca conductividad de algunos fluidos, como los líquidos orgánicos la cual imposibilita el uso de sondas conductivas. A parte de todo estos, existen dificultades a la hora de interpretar los resultados debido a las características geométricas de las burbujas a medir, es decir si están más o menos distorsionadas, fenómenos ligados a la turbulencia o la categorización de las burbujas.

La resolución de estos problemas, en cada caso determino, constituye, actualmente, el límite de esta técnica de medida. Aún con todos estos problemas sigue siendo un sistema muy atractivo ya que no es caro, y con una tarjeta que permita un muestreo del orden de 1-10 kHz suele ser suficiente.

Sonda de Impedancia

Zenit et al., [Zenit2001], utilizando una sonda doble de impedancia estudian fracciones de huecos, velocidades de burbujas y dimensiones de las mismas. Boyer y sus colaboradores [Boyer2002] hacen referencia a un gran número de trabajos desarrollados mediante sondas de impedancia, aplicada sobre todo al análisis de reactores químicos.

Es una técnica empleada en la medida de la fracción de huecos en mezclas bifásicas liquido-gas en las cuales la resistividad eléctrica entre ambas sustancias o fases es alta. También es empleada para obtener la fracción de volumen espacial promedio a través de una pequeña región de la sección de flujo y una medida de la velocidad superficial de burbuja. Esta técnica de medida local tiene como principio de funcionamiento la medición de los cambios locales en la impedancia eléctrica mezclas bifásicas empleando la diferencia de impedancia eléctrica entre el gas y liquido para determinar el tiempo de residencia de burbujas en un espacio pequeño de volumen adyacente a la punta de la sonda, la cual consiste en un electrodo pequeño introducido en una sección de tubo capilar que actúa como tierra. El electrodo es excitado con tensión eléctrica en corriente alterna.

Cuando las burbujas pasan cerca de la punta, la impedancia local y la corriente a través del electrodo es afectada, entonces la amplitud de la señal se convierte en una señal de voltaje de DC por un circuito electrónico.

Si una sonda idéntica se posiciona en una distancia conocida en la dirección axial, es posible estimar la velocidad de la burbuja. Las señales están correlacionadas y el tiempo que pasa después de que una burbuja toca una y otra punta puede ser calculado como el valor del tiempo de señal *shift* que maximiza la función correlación:

$$F_{V_1V_2}(\tau) = \frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} V_1(t)V_2(t-\tau)dt \quad (2.38)$$

Donde t_s es el tiempo de muestreo, V_1 y V_2 son los voltajes obtenidos de las sondas. La velocidad de la burbuja puede ser calculada como:

$$u_b = \frac{D}{\tau_{\max}} \quad (2.39)$$

Donde D es la separación entre las puntas. Esta técnica ha sido empleada junto con otras técnicas suplementarias para complementar la información experimental [Zenit20001], [Waniewski1999], [Ceccio1996].

Tomografía de impedancia eléctrica [George2000]

Es una técnica que permite obtener perfiles de la distribución de fracción de volumen de flujos bifásicos líquido-gas y sólidos-liquido. Para ello emplea una reconstrucción de la distribución de impedancia dentro de una sección para deducir la distribución de fase. Para ello emplea un gran número de electrodos en una distribución especial que permite aprovechar las diferencias entre la impedancia eléctrica de las fases líquido y gas para producir una distribución de impedancia eléctricas.

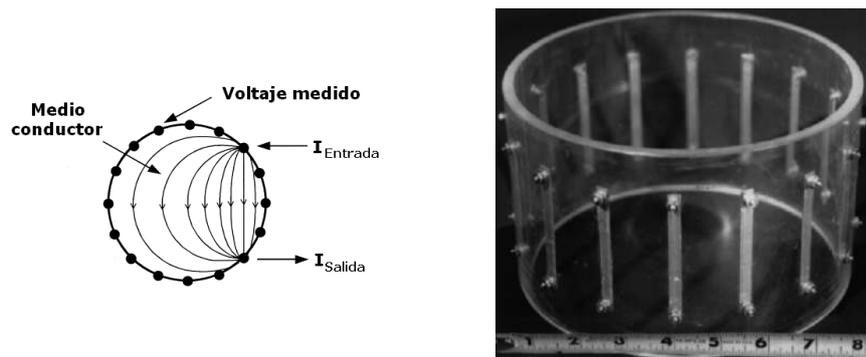


Figura 2.16 Tomografía de Impedancia

Esta técnica requiere un gran esfuerzo en el procesamiento de la señal debido a la cantidad de algoritmos que requiere para incorporar toda la información proveniente de los emisores y receptores eléctricos.

Sonda de conductividad

Kim et al. [Kim2000] desarrollan una sonda de conductividad de 4 sensores con la que determinan tamaño, velocidad y distribución de burbujas. Euh y colaboradores, [Euh2001], basándose en esta sonda desarrollan una nueva de 5 sensores mejorando las capacidades de la anterior.

Capítulo 2. Antecedentes

Por su parte una serie de investigadores utilizan esta sonda de 4 sensores para determinar la distribución de área interfacial en un gran número de experimentos en tuberías con gran éxito, como Takamasa [Takamasa2003], Hibiki [Hibiki2003a], Hibiki [Hibiki2003c], Fu [Fu2003a], [Fu2003b] o Kim [Kim2003].

Por otro lado, Wu y colaboradores, [Wu2001], desarrollan y prueban una sonda de impedancia aplicándola también a la medida de área interfacial, pero con capacidades mucho más limitadas.

Se han realizado también experimentos en donde dos o más técnicas se complementan por ejemplo empleando sondas de impedancia con sistemas de adquisición y análisis de imagen [Jeanmeure2002], [Saito2005], [Zun2002].

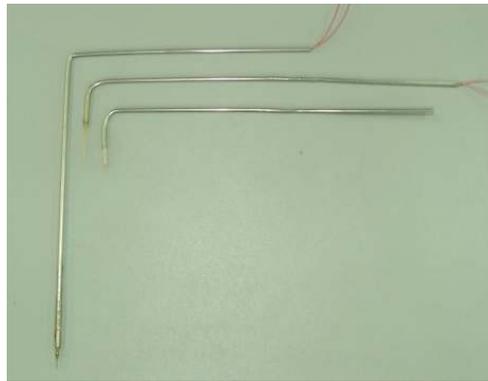


Figura 2.17 Sonda de conductividad

2.5 Nomenclatura

A	Sección de área transversal
B_d	Volumen de una partícula dispersa típica
C	Capacitancia
d	Distancia
D	Separación entre puntas
E_c	Tasa de dispersión turbulenta
e	Energía por unidad de masa
$f(u)$	Eficiencia de energía cinética
f_{BV}	Cociente de masa de burbuja hija entre burbuja madre
F	Fuerza
F_D	Fuerza de fricción estándar
F_v	Fuerza de masa virtual

f	Factor de calibración
g	Fuerza de cuerpo
G	Conductancia
I_k	Fuente interfacial para la fase k
J	Flujo a través de la superficie
L_s	Longitud de escala
M_{ik}	Fuerza de arrastre interfacial
m	masa
n	Vector normal a la superficie
n	Numero de burbujas
P_{RC}	Probabilidad de choque
P	Presión
q	Flujo de calor
\dot{q}	Generación interna de calor
T_{ij}	Tasa de desintegración de burbujas j en i
s	Fuente interfacial de la propiedad ψ
T	Tensor de esfuerzos viscosos
t	Tiempo
t_{ij}	Tiempo transcurrido para coalescencia entre burbujas i y j
u_t	Fluctuación turbulenta de la velocidad
u_{tcr}	Fluctuación turbulenta de la velocidad critica
u	Energía interna
V	Voltaje
v_i	Velocidad de interfase
v_k	Velocidad del centro de masa de partícula fluida
we_{cr}	Numero de Weber critico
Y	Admitancia

Símbolos griegos

ρ	Densidad
α	Fracción de huecos
ψ	Cantidad por unidad de masa
ϕ	Disipación viscosa
τ	Esfuerzo interfacial tangencial
τ_{ij}	Tiempo de contacto en régimen turbulento
Γ	Generación de masa
θ	Tasa de colisión
ε	Capacidad de la mezcla
β	Ángulo entre fuente y observador
ϕ	Fuente de volumen
μ	Viscosidad
λ	Eficiencia de colisión

Subíndices

k Fase k
j Burbuja j
i Burbuja i
i Interfase

Superíndice

T Fluctuación turbulenta
^ Cantidad vectorial
= Promedio temporal

2.6 Bibliografía y referencias

[Boyer2002]. Christophe Boyer, Anne-Marie Duquenne, Gabriel Wild. Measuring techniques in gas-liquid and gas-liquid-solid reactors. Chemical Engineering Science, Volume 57, Issue 16, (2002) 3185-3215.

[Carvalho1992] R. de Carvalho, A.E. Bergles. The pool nucleate boiling and critical heat flux of vertically oriented, small heaters boiling on one side, Rensselaer Polytechnic Institute, Heat Transfer Laboratory Report HTL-12, 1992. vertical duct, ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vancouver, B.C., Paper FEDSM97-3518, (1997).

[Cheng1998]. H. Cheng, J. H. Hills, B. J. Azzopardi. A study of the Hubble-to-slug transition in vertical gas-liquid flow in columns of different diameter. Int. J. Multiphase Flow. Vol. 24, no. 3, (1998) 431-452.

[Cheng2006]. Cheng, Simon, Alvin. Modelling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model. Atmospheric Environment, 40 (2006) 357-367.

[Coula1977]. C. A. Coualoglou, L. L. Tavlarides. Description of interaction processes in agitated liquid-liquid dispersions. Chem. Eng. Sci. 32 (1977) 1289-295.

[Duncan1993] Duncan, D., Trabold, T.A., Mohr, C.L., Berret, M.K., Measurement of Local Void fraction at Elevated Temperature and pressure. Third World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Honolulu, Hawaii, EE.UU, (1993).

[Euh2001]. D. J. Euh, B. J. Yun, C. H. Song, T. S. Kwon, M. K. Chung and U. C. Lee. Development of the five-sensor conductivity probe method for the measurement of the interfacial area concentration, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 205, Issues 1-2, (2001) 35-51.

[Fairbank1977]. W. M. Fairbank, M. O. Scully. A new non-invasive technique for cardiac pressure measurement: resonant scattering of ultrasound from bubbles, *IEEE Transactions in Biomedical Engineering* 24 (1997) 107-110.

[Farrar1995] Farrar, B., Samways, A., Ali, J., Bruñi, H.H.. 1995. A computer-based hot-film technique for two-phase flow measurements. *Meas. Sci. Technol.* 6 (1995) 1528-1537.

[Foreman1965]. J. W. Foreman, E. W. George, R. D. Lewis. Measurement of localized flow velocities in gases with a laser Doppler flow meter. *Applied Physics Letters* 7 (1965) 77-78, (1965).

[Fu2003a] X. Y. Fu and M. Ishii Two-group interfacial area transport in vertical air–water flow: I. Mechanistic model, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 219, Issue 2, (2003) 143-168.

[Fu2003a] X. Y. Fu and M. Ishii Two-group interfacial area transport in vertical air–water flow: II. Model Evaluation, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 219, Issue 2, (2003) 169-190.

[Funfschilling2001]. D. Funfschilling, H. Z. Li. Flow of non-Newtonian fluids around bubbles: PIV measurements and birefringence visualisation. *Chemical Engineering Science* 56 (2001) 1137-1141.

[Garnier2001] Garnier, C., Lance, M., Marié, J. L. Measurement of local flow characteristics in buoyancy-driven bubbly flow at high void fraction. *International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans (2001).

[Garnier2002]. C. Garnier, M. Lance, J. L. Marié. Measurement of local flow characteristics in buoyancy-driven bubbly flow at high void fraction. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 26 (2002) 811-815.

[Gillard2007]. Guillar, Duval. A Darcy law for the drift velocity in a two phase flow model. *Journal of Computational Physics*. 224 (2007) 288-313.

[Guét2004]. Guet, Ooms, Oliemans. Bubble size effect on low liquid input drift–flux parameters. *Chemical Engineering science*. 59 (2004) 3315-3329.

Capítulo 2. Antecedentes

[Hasan1994]. A. R. Hasan, C. S. Kabir, S. Srinivasan. Countercurrent Bubble and Slug Flows in a vertical system. *Chemical Engineering Science*. Vol. 46, no. 16, (1994) 2567-2574.

[Hinze1955]. Hinze, J. O. Fundamentals of the hydrodynamics of mechanics of splitting in dispersion process. *AIChE J.* 3 (1955) 289-295.

[Hibiki2000] T. Hibiki, M. Ishii, One-group interfacial area transport of bubbly flows in vertical round tubes, *Int. J. Heat Mass Transfer*. 43 (2000) 2711-2726.

[Hibiki2000a] T. Hibiki, M. Ishii, Two-group interfacial area transport equations at bubbly-to-slug flow transition in a vertical round pipe, in: *Proceedings of 34th National Heat Transfer Conference*, Pittsburgh, PA, USA (2000).

[Hibiki2002a]. Hibiki, Ishii. Interfacial Area Concentration of Bubbly flow systems. *Chem. Eng. Sci.* 57 (2002) 3967-3977.

[Hibiki2002b] Hibiki, Ishii. Distribution Parameter and Drift Velocity of Drift Flux Model in Bubbly Flow, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 707-721.

[Hibiki2003a] Takashi Hibiki, Rong Situ, Ye Mi and Mamoru Ishii Modelling of bubble-layer thickness for formulation of one-dimensional interfacial area transport equation in subcooled boiling two-phase flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 46, Issue 8, (2003) 1409-1423.

[Hibiki2003b] Takashi Hibiki, Rong Situ, Ye Mi and Mamoru Ishii. Local flow measurements of vertical upward bubbly flow in an annulus. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 46, Issue 8 (2003) 1479-1496.

[Hibiki2003c] Hibiki, Ishii. One-dimensional Drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various Two-phase flow regimes. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 46. (2003) 4935-4948; Erratum 48 (2005) 1222-1223

[Hoeath1964]. W. L. Howarth. Coalescence of drops in a turbulent flow field. *Chem. Eng. Sci.* 19 (1964) 33-38.

[Ishii1975]. Thermo-Fluid dynamics theory of two-phase flow. *Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricite de France*, Eyrolles, Paris (1975).

[Ishii1977]. M. Ishii, One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes, ANL-77-47 (1977).

[Ishii1984]. M. Ishii and K. Mishima. Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations, Nuclear Engineering Design. 82 (1984) 107–126.

[Ishii1993]. M. Ishii, G. Kojasoy. Interfacial area transport equation and preliminary considerations on closure relations. Purdue University Report, PU-NE-93-6 (1993).

[Ishii1998] M. Ishii, Q. Wu, A. Assad, J. Uhle, Interfacial area transport equation for two-fluid model formulation. Proceedings of IMuST Meeting (1998).

[Ishii2006]. M. Ishii, T. Hibiki. Thermo-fluid dynamics of two-phase flow. Springer, 2006

[Jackson1964]. R. Jackson. The formation and coalescence of drops and bubbles in liquid. Chemical Engineer. (1964) 107-117.

[Jackson1970]. D. A. Jackson, D. M. Paul. Measurement of hypersonic velocities and turbulence by direct spectral analysis of Doppler shifted laser light. Physics Letters 32 (1970) 77-78.

[Jeanmeure2002]. Laurent F.C. Jeanmeure, Tomasz Dyakowski, William B.J. Zimmerman, Wayne Clark. Direct flow-pattern identification using electrical capacitance tomography. Experimental Thermal and Fluid Science. 26 (2002) 763-773.

[Jones1978]. O. C. Jones, N. Zuber. Use of a cylindrical hot-film anemometer for measurement of two phase void and volume flux probes in a narrow rectangular channel. Heat Transfer: Research and Application, AIChE Symposium Series 74 (174) (1978) 191-204.

[Kawaguchi2001]. T. Kawaguchi, Y. Niwa, K. Hishida, M. Maeda. Spatial distribution of bubble size and velocity in gas absorbing process measured by interferometric laser imaging. International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, EEUU. (2001).

[Kim1999]. S. Kim. Interfacial Area Transport Equation and Measurement of local interfacial Characteristics. PhD Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, USA. (1999).

Capítulo 2. Antecedentes

[Kim2000] S. Kim, X. Y. Fu, X. Wang and M. Ishii, Development of the miniaturized four-sensor conductivity probe and the signal processing scheme, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 43 (2000) 4101-4118

[Kim2003] Seungjin Kim, Xiaodong Sun, Mamoru Ishii, Stephen G. Beus and F. Lincoln Interfacial area transport and evaluation of source and sink terms for confined air–water bubbly flow. *Nuclear Engineering and Design*. 219 (2003) 61-75

[Kirkpatrick1974]. R. D. Kirkpatrick, M. J. Lockett. The influence in of approach velocity on bubble coalescence. *Chem. Eng. Sci.* 29 (1974) 2363-2373.

[Kirouac1999] G.J. Kirouac , T.A. Trabold, P.F. Vassallo, W.E. Moore, R. Kumar, Instrumentation development in two-phase flow, *Experimental Thermal and Fluid Science* 20 (1999) 79-93.

[Kleinsteurer2003]. Clement Kleinsteurer. *Two-Phase Flow. Theory and Applications*. Taylor and Francis

[Kocamustafaogullari1983]. G. Kocamustafaogullari, M. Ishii, Interfacial area and nucleation site density in boiling systems, *Int. J. Heat Mass Transfer* 26 (1983) 1377-1387.

[Kocamustafaogullari1994]. G. Kocamustafaogullari, W. D. Huang, J. Razi. Measurement and Modelling of average void fraction, bubble size and interfacial area. *Nuclear Engineering and Design*, 148 (1994) 437-453.

[Kocamustafaogullari1995] G. Kocamustafaogullari, M. Ishii. Foundation of the interfacial area transport equation and its closure relations. *Int. J. Heat Mass Transfer* 38 (1995) 481-493.

[Kirouac1999]. G.J. Kirouac, T.A. Trabold, P.F. Vassallo, W.E. Moore, R. Kumar. Instrumentation development in two-phase Flow. *Experimental Thermal and Fluid Science* 20 (1999) 79-93.

[Lahey]. R. T. Lahey, Jr., F. J. Moody. *The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor*. American Nuclear Society.

[Larue2001] Larue de Tournemine, A., Roig, V., Suzanne, C., 2001. Experimental study of the turbulence in bubbly flows at high void fraction. *International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans (2001).

[Leighton1997]. T. G. Leighton, D. G. Ramble, A. D. Phelps. The detection of tethered and rising bubbles using multiple acoustic techniques. *Journal of the Acoustical Society of America* 101 (1997) 2626-2635.

[Leighton1998]. T. G. Leighton, P. R. White, F. Schneider. The detection and dimension of bubble entrainment and comminution. *Journal of the Acoustical Society of America* 103 (1998) 1825-1835.

[Lindken1998]. R. Lindken, W. Merzkirch. A novel PIV technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows. *Experiments in Fluids* 33 (2002) 814-825.

[Lou1996]. H. Lou, H. F. Svendsen. Theoretical model for drop and bubble breakup in turbulent dispersions. *AIChE Journal*. 42 (1996) 1225-1233.

[Manase1998]. R. Manase, S. Yoshida, M. Rudman. Bubble formation processes and bubble acoustic signals. *Third International Conference on Multiphase Flow, (Lyon, France), (1998)*.

[Martinez-Bazan1999a]. C. Martínez-Bazan, J. L. Montanes, J. C. Lasheras. On the breakup of fan air bubble injected into a fully developed turbulent flow. Part 1: Breakup frequency. *Journal of Fluids Mechanics* 401 (1999) 157-182.

[Martinez-Bazan1999b]. C. Martínez-Bazan, J. L. Montanes, J. C. Lasheras. On the breakup of fan air bubble injected into a fully developed turbulent flow. Part 2: Size PDF of the resulting daughter bubbles. *Journal of Fluids Mechanics* 401 (1999) 183-207.

[McNeil2003]. David A. McNeil, Alastair D. Stuart. The effects of a highly viscous liquid phase on vertically upward two-phase flow in a pipe. *Int. J. of Multiphase Flow*. 29 (2001) 1523-1549.

[Milenković2005]. Milenkovic, R., Sigg, B., Yadigaroglu, G., 2005. Study of periodically excited bubbly jets by PIV and double optical sensors. *Int. J. Heat Fluid Flow*. 26 (2005) 922-930.

[Milenković2007a]. Rade Ž. Milenković, Beat Sigg, George Yadigaroglu. Bubble clustering and trapping in large vortices. Part 1: Triggered bubbly jets investigated by phase-averaging. *International Journal of Multiphase Flow*. 33 (2007) 1088-1110.

[Milenković2007b]. Rade Ž. Milenković, Beat Sigg, George Yadigaroglu. Bubble clustering and trapping in large vortices. Part 2: Time-dependent trapping conditions. *International Journal of Multiphase Flow*. 33 (2007) 1111-1125.

[Miller1981]. D. L. Miller. Ultrasonic detection of resonant cavitation bubbles in a flow tube by their second-harmonic emissions. *Ultrasonics* 19 (1981) 217-224.

Capítulo 2. Antecedentes

[Morel1999] C. Morel, N. Goreaud, J.M. Delhay. The local volumetric interfacial area transport equation: derivation and physical significance. *Int. J. Multiphase Flow* 25 (1999) 1099-1128.

[Mudde1997]. R. F. Mudde, J. S. Groen, H. E. A. Van Den Akker. Liquid velocity field in a bubble column: LDA experiments. *Chemical Engineering Science* 52 (1997) 4217-4224.

[Muñoz-Cobo]. José Luís Muñoz-Cobo González, Alberto Escrivá Castells. *Apuntes de Termohidráulica*. Editorial de la UPV

[Nacef2007]. Nacef, Sohuila Poncin. Drift flux concept in two- and three-phase reactors. *Chemical Engineering Science*. 62 (2007) 7530-7538.

[Newhouse1984]. V. L. Newhouse, P. M. Shankar. Bubble sizing using the nonlinear mixing of two frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America* 75 (1984) 1473-1477.

[Nevers1977]. N. De Nevers, J. L. Wu. Bubble coalescence in viscous fluids. *AIChE J.* 17 (1977) 182-186.

[Nishi1972]. R. Y. Nishi. Ultrasonic detection of bubbles with Doppler flow transducers. *Ultrasonics* 10 (1972) 173-179.

[Otake1977]. T. Otake, S. Tone, K. Nakao, Y. Mitsuhashi. Coalescence and breakup of bubbles in liquids. *Chemical Engineering Science* 32 (1977) 377-383.

[Penney1969]. C. M. Penney, "Differential Doppler velocity measurements", *IEEE Journal of Quantum Electronics* QE-5, pp. 318, (1969).

[Phelps1996]. A. D. Phelps, T. G. Leighton. High-resolution bubble sizing through detection of the subharmonic response with a two-frequency excitation technique. *Journal of the Acoustical Society of America* 99 (1996) 1985-1992.

[Phelps1997]. A. D. Phelps, D. G. Ramble, T. G. Leighton. The use of a combination frequency technique to measure the surf zone bubble population. *Journal of the Acoustical Society of America* 101 (1997) 1981-1989.

[Prasser2008]. H. M. Prasser. Novel experimental measuring techniques required to provide data for cfd validation. *Nuclear Engineering and Design* 238 (2008) 744 -770.

[Prasser2008a]. Th. Frank, P.J. Zwart, E. Krepper, H.-M. Prasser, D. Lucas. Validation of CFD models for mono- and polydisperse air–water two-phase flows in pipes. *Nuclear Engineering and Design*. 238 (2008) 647-659.

[Prince1990]. M. J. Prince, H. W. Blanch. Bubble coalescence and break-up in air sparged bubble columns. *AIChE J.* 36 (1990) 1485-1499.

[Reyes1989] J.N. Reyes, Statistically derived conservation equations for fluid particle flows. *Trans. Am. Nucl. Soc.* 60 (1989) 669-670.

[Saito2005]. Y. Saito, K. Mishima, Y. Tobita, t. Suzuki, M. Matsubayashi. Measurements of liquid-metal two-phase flow by using neutron radiography and electrical conductivity probe. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 29 (2005) 323-330.

[Salesse2002]. A. Salesse, A. Larue de Tournemine and V. Roig. Development of bubble cluster detection and identification method. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 26 (2002) 163-171.

[Sheng1991]. Y. Y. Sheng, G. A. Irons. A combined laser Doppler anemometry and electrical probe diagnostic for bubble two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow* 17 (1991) 585-598.

[Shen2008] Xiuzhong Shen, Kaichiro Mishima, Hideo Nakamura. Error reduction, evaluation and correction for the intrusive optical four-sensor probe measurement in multi-dimensional two-phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 51 (2008) 882–895.

[Snabre1998]. P. Snabre, F. Magnifotcham. Formation and rise of a bubble stream in a viscous liquid. *European Physics Journal* 4 (1998) 369-377.

[Stewart1995]. C. W. Stewart. Bubble interaction in low viscosity liquids. *Int. J. Miltiphase flow* 21 (1995) 1037-1046.

[Sun2002]. X. Sun, S. Kim, T. R. Smith, M. Ishii. Local liquid velocity measurements in air-water bubbly flow. *Experimenta in Fluids*. 33 (2002) 653-662.

[Sun2004]. Xiaodong Sun, Sidharth Paranjape, Mamoru Ishii, Jennifer Uhle. LDA measurements in air-water downward flow. *Experimental thermal and fluid science* 28 (2004) 317-328.

[Takamasa2003]. T. Takamasa, T. Goto, T. Hibiki and M. Ishii. Experimental study of interfacial area transport of bubbly flow in small-diameter tube. *International Journal of Multiphase Flow*. 29 (2003) 395-409.

Capítulo 2. Antecedentes

[Trabold1994] T.A. Trabold, W.E. Moore, W.O. Morris, P.D. Symolon, P.F. Vassallo, G.J. Kirouac. Two phase flow of freon in a vertical rectangular duct Part II: Local void fraction and bubble size measurements. iI. Celik et al. (Eds.), *Experimental and Computational Aspects of Validation of Multiphase Flow CFD Codes*, FED-Vol. 180 (1994) 67-76.

[Trabold1997] T.A. Trabold, W.E. Moore, W.O. Morris. Hot-film anemometer measurements in adiabatic two phase refrigerant flow through a vertical duct. ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vancouver, B.C., Paper FEDSM97-3518 (1997).

[Trabold1998] T.A. Trabold, R.Kumar, PF Vassallo. Annular Flow of R-134A Through a Hig Aspect Ratio Duct: Local Void Fraction, Droplet Velocity and Droplet Size Measurement. KAPL-P-000071 (1998).

[Tsao1997]. H. K. Tsao, D. L. Koch. Observations of high Reynolds number bubbles interacting with a rigid wall. *Physics of Fluids* 9 (19997) 44-56.

[Tse1998]. K. Tse, T. Martin, C. M. McFarlane, A. W. Nienow. Visualization of bubble coalescence in a coalescence cell, a stirred tank and a bubble column. *Chemical Engineering Science* 53 (1998) 4031-4036.

[Ujang2006]. Priscilla M. Ujang, Christopher J. Lawrence, Colin P. Hale, Geoffrey F. Hewitt. Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow 32 (2006) 527-552.

[Vasallo1999]. P. F. Vasallo, R. Kumar. Liquid and gas velocity measurements using LDV in air-water duct flow. *Experimental Thermal and Fluid Science* 19 (1999) 85-92.

[Wang2003].

[Webster2000]. Jhon G. Webster. The measurement, instrumentation, and sensors handbook. Springer (2000).

[Wu1998] Q. Wu, S. Kim, M. Ishii, S.G. Beus. One-group interfacial area transport in vertical bubbly flow. *Int. J. Heat Mass Transfer* 41 (1998) 1103-1112.

[Wu2001]. Q. Wu, K. Welter, D. McCreary, J. N. Reyes. Theoretical studies on the design criteria of double-sensor probe for the measurement of bubble velocity. *Flow Measurement and Instrumentation*. 12 (2001) 43-51.

2.6 Bibliografía y referencias

[Yeh1964]. Y. Yeh, H. Z. Cummins. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer. *Applied Physics Letters* 4 (1964) 176-178.

[Zenit2001] Zenit, R., Koch, D.L., Sangani, A.S. Measurements of the average properties of a suspension of bubbles rising in a vertical channel. *J. Fluid Mech.* 429 (2000) 307-342.

[Zuber1965]. N. Zuber, J. A. Findlay. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. *J. Heat Trans.* 87 (1965) 453.

[Zun2002]. I. Zun. Phase discrimination vs. multiscale characteristics in bubbly flow. *Experimental Thermal and Fluid Science.* 26 (2002) 361-374.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

3.1 Introducción	III - 1
3.2 Antecedentes	III - 2
3.3 Principio de medición	III - 3
3.3.1 Principio físico	III - 3
3.3.2 Principio matemático de medida.....	III - 4
3.4 Construcción	III - 19
3.4.1 Selección de materiales y procesos.....	III - 19
3.4.2 Proceso de ensamble	III - 27
3.4.3 Dimensiones del prototipo empleado.....	III - 28
3.4.4 Circuito, cableado y control de ruido eléctricos	III - 29
3.5 Instalación y operación	III - 34
3.5.1 Instalación	III - 34
3.5.2 Sistema de Posicionamiento.....	III - 36
3.5.3. Adquisición de datos	III - 39
3.6 Esquema de procesado de la señal	III - 41
3.6.1 Acondicionamiento de la señal	III - 41
3.6.2 Categorización	III - 43
3.6.3 Parámetros de flujo instantáneos.....	III - 46
3.7 Comprobación de resultados.....	III - 47
3.7.1 Comprobaciones durante la fabricación.....	III - 47
3.7.2 Comprobaciones visuales de los resultados	III - 48
3.7.3 Comprobaciones con otros instrumentos de medida.....	III - 52
3.7.4 Comparación de resultados	III - 56
3.8 Degradación de la sonda	III - 62
3.9 Nomenclatura	III - 64
3.10 Referencias.....	III - 66

3.1 Introducción

La sonda de conductividad es un instrumento invasivo que permite medir algunos parámetros locales de flujo bifásico, como son la fracción de huecos, la velocidad superficial de burbuja, distribución del número de burbujas, concentración de área interfacial y tamaño de burbuja.

Este dispositivo de medición consta de puntas o sensores colocados en una disposición geométrica determinada que permiten detectar el cambio de conductividad debido a la fase presente en un punto. Los sensores se encuentran dentro de un cuerpo cilíndrico de acero inoxidable del que sobresalen cuatro agujas de acupuntura cubiertas con una fina capa de barniz aislante (tres agujas de la misma longitud y una más larga). Por el interior del cuerpo cilíndrico se encuentran conductores que suministran una tensión de corriente continua a las agujas. La figura 3.1 muestra la parte más importante de una sonda de conductividad, se observa la configuración geométrica de las puntas empleadas en este trabajo.

En este capítulo se detalla el principio de funcionamiento físico y matemático. En el primer apartado llamado antecedentes se describe la evolución de éste dispositivo desde que fue propuesto por vez primera en la década de 1960, a continuación se describe el principio de funcionamiento físico y matemático, posteriormente son descritos la construcción y operación de este dispositivo, el esquema de procesado de la señal y la validación de las medidas obtenidas.



Figura 3.1 Sonda de conductividad

3.2 Antecedentes

Fue aplicado por vez primera en la caracterización de flujo bifásico por Neal y Bankoff [Neal1963] para la medida de la fracción de huecos. Con las señales adquiridas la fracción de huecos promedio en el tiempo fue obtenida contabilizando la fracción de tiempo ocupada por la fase gaseosa durante el tiempo total de muestreo.

Con dos puntas separadas una distancia conocida, la velocidad superficial de la burbuja proyectada en tal dirección puede ser determinada. Ishii [Ishii1975] definió la concentración de área interfacial local y temporal en 1975 y ello posibilitó que con la información de la sonda con múltiples puntas se efectuase su medición. Hasta finales de la década de 1980 la sonda pudo ser aplicada en la medición de la concentración de área interfacial de acuerdo con la formulación teórica de Kataoka y colaboradores [Kataoka1986] quienes establecieron que la concentración de área local promedio puede ser relacionada con la media armónica de la velocidad interfacial, esto creó una manera de medir el área interfacial directamente a través de la velocidad medida.

Kataoka [Kataoka1994] compara dos modelos de sondas de resistividad eléctrica (así llamadas por él): la sonda de dos puntas y de cuatro puntas. Observa que la sonda de dos puntas sobreestima la concentración de área interfacial para ángulos de ataque pequeños de la burbuja mientras que proporciona una exactitud razonable para burbujas pequeñas y ángulos grandes de golpeo. El modelo de 4 puntas da medidas más exactas particularmente para burbujas de diámetro grande y pequeños ángulos de golpeo mientras que para burbujas pequeñas con grandes ángulos de golpeo la probabilidad de escape de la burbuja a través del sensor es grande y ocasiona una mala precisión.

Simulaciones numéricas del movimiento de la burbuja pasando a través del sensor, el estudio del efecto del espaciado de las puntas en la sonda y el tamaño de burbuja se emplean para estimar factores de calibración. Wu y colaboradores [Wu1999] propusieron un factor de corrección para la sonda de dos puntas mediante la comparación de medidas experimentales y simulaciones numéricas detalladas, en cuanto a la calibración teórica del sensor han sido realizados por el profesor Muñoz-Cobo y sus colaboradores [Muñoz-Cobo2007]. Kalkach-Navarro [Kalkach-Navarro1993] efectuaron mediciones locales empleando sondas de dos puntas con un modelo teórico derivado de la suposición de que las burbujas son esféricas cuyo tamaño puede representarse por una función distribución de probabilidad

Capítulo 3. Sonda de conductividad

Por otra parte, la sonda de cuatro puntas permite medir las tres componentes de la velocidad superficial cuando la burbuja pasa a través de los cuatro sensores [Kataoka1986]. En años recientes se han realizado pruebas experimentales en las que sondas de cuatro puntas han sido empleadas en flujos bubbly, bubbly finamente disperso, en regímenes en transición, en flujos bala y en flujo anular [Kim2000] [Shen2005] [Jeong2008] [Hazuku2007]; y en configuraciones de mas de cuatro sensores [Euh2001]. Esta técnica aun sigue empleándose en múltiples instalaciones experimentales.

Kataoka e Ishii efectuaron un completo estudio teórico que demuestra que la concentración de área interfacial promedio temporal local puede ser relacionada únicamente con la media armónica de la velocidad interfacial [Kataoka1986] esto permitió obtener una medida de la concentración de área interfacial con base en la medida de la velocidad interfacial. Con este método soportado teóricamente es posible, con el empleo de sensores de dos o mas puntas, medir experimentalmente los parámetros de flujo más importantes entre los que destaca la concentración de área interfacial [Kataoka1990] [Kocamustafaogullari1991] [Revankar1992] [Revankar1993]. Kalkach-Navarro [Kalkach-Navarro1993] efectuó medidas locales con la sonda de dos puntas partiendo del supuesto de que las burbujas medidas son esféricas y su tamaño puede determinarse mediante una función distribución de la probabilidad del tamaño de burbuja [Valenti1991]. Estos métodos han sido probados por diversos autores con un notable éxito [Kataoka1994] [Hibiki1998] [Kim1998] [Wu1999] [Barrau1999]. Por otro lado la anemometría de hilo caliente ha sido empleada en la medida de la intensidad de turbulencia y el perfil de velocidades de la fase líquida [Hibiki1998] [Serizawa1975] [Theofanous1982] [Wang1987] [Suzanne1998].

3.3 Principio de medición

3.3.1 Principio físico

La primera aplicación dada a la sonda de conductividad fue la de un identificador de fase cuando es introducido en una mezcla bifásica liquido-gas: responde ante las diferencias de conductividad eléctrica del aire y agua, de modo que las señales eléctricas adquiridas con este dispositivo poseen caídas y subidas de tensión que permiten identificar el momento en el cual una burbuja toca las puntas del sensor.

3.3 Principio de medición

En presencia de líquido el valor de la tensión eléctrica que proporciona la sonda es distinto a la obtenida en presencia de aire. Este cambio de tensión obedece a que el agua posee una capacidad mayor que el aire para permitir que el paso de corriente eléctrica (la conductividad eléctrica del agua es del orden de 5mS/m mientras que la del aire es casi nula). Las señales adquiridas con este sensor poseen caídas y subidas de tensión que reflejan el paso de burbujas de aire a través del sensor.

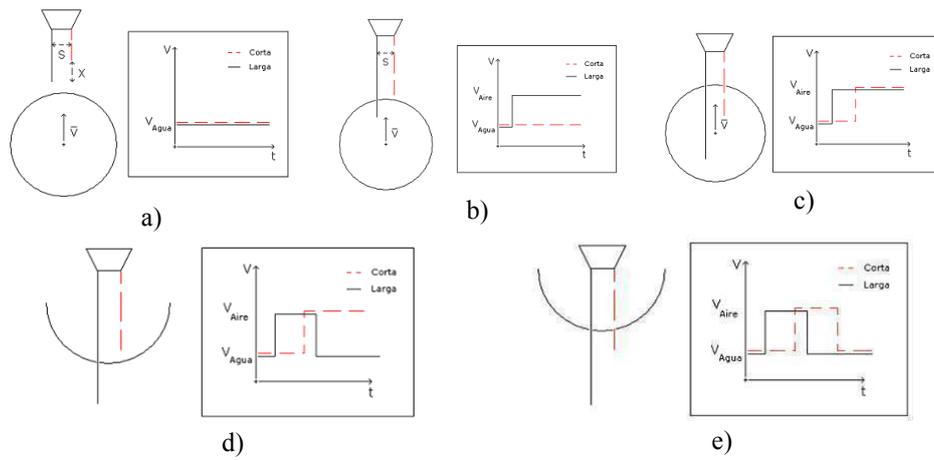


Figura 3.2 Principio físico

La figura 3.2 muestra la relación que existe entre señal eléctrica y el medio presente en las puntas del sensor. En la imagen de 3.2.a el medio en el que esta inmersa la sonda es agua y la señal eléctrica tiene un valor V_{Agua} , cuando una burbuja toca una punta del sensor, figura 3.2.b, la señal eléctrica cambia de estado a V_{Aire} (tensión eléctrica que corresponde cuando el medio es aire). El estado de la señal no cambia hasta transcurrido un tiempo la burbuja abandona la zona de influencia de la punta a partir del cual la señal vuelve a presentar un valor V_{Agua} , figura 3.2.c y figura 2.2.d.

En este caso se muestra la situación mas simple que es la sonda de dos puntas, el principio de operación es el mismo para la sonda de mayor número de puntas, es el esquema de procesado de la señal y su interpretación lo que cambia en cada modelo.

3.3.2 Principio matemático de medida

Con las señales adquiridas los parámetros de flujo locales promedio en el tiempo pueden ser obtenidos.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

La información extraída directamente de la señal es el tiempo durante el cual el sensor fue expuesto a la fase gaseosa, el tiempo relativo entre el cual la burbuja toca las puntas larga y corta, y el número de burbujas que golpean al sensor. A partir de esta información se obtienen las medidas de los parámetros locales que se describen a continuación.

a) Fracción de huecos

La fracción de huecos promedio en el tiempo se obtiene a partir del tiempo acumulado durante el cual un sensor de la sonda es expuesto a la fase gaseosa dividido por el tiempo total de muestreo, que suele ser de 30 segundos a una frecuencia de 15000 muestras/segundo. La ecuación 3.1 es aplicada para determinar la fracción de huecos detectada por la punta más larga, la fracción de huecos promedio, el tiempo total de muestreo y el tiempo que ocupa la fase gaseosa en la burbuja i esta representado por α , T y t_g respectivamente.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n t_g}{T} \quad (3.1)$$

b) Velocidad interfacial de burbuja

Considerando la distancia de separación entre puntas (larga – corta) s , y el lapso de tiempo que tarda una burbuja en recorrer dicha distancia, es posible conocer la componente de la velocidad superficial de la burbuja en la dirección de la separación entre agujas s , ecuación (3.2). La figura 3.3 muestra esquemáticamente esta distancia s medida desde la punta larga hasta una punta corta de referencia. En la grafica se observa el valor de Δt que representa la diferencia entre los tiempos de levantamiento de las señales ($t_L - t_C$). Con los datos conocidos es posible obtener un valor de la velocidad de la burbuja.

$$v_b = \frac{s}{\Delta t} \quad (3.2)$$

3.3 Principio de medición

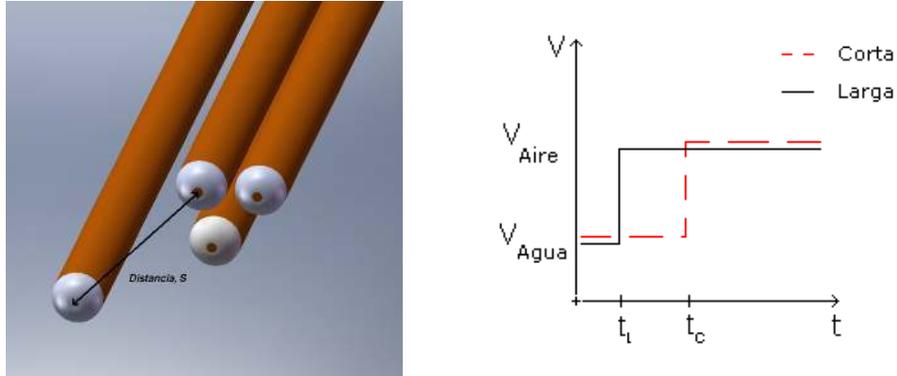


Figura 3.3 Cálculo de la velocidad superficial

En realidad, dicho valor medido de la velocidad de burbuja es la proyección de la velocidad real de burbuja en la dirección s . Debido a que la burbuja no posee un movimiento lineal y las burbujas no son esféricas completamente es empleado un desarrollo numérico para obtener una velocidad interfacial de burbuja real. Sea $f(\bar{x}, t) = 0$ la ecuación que representa la interfase de una burbuja en el instante de tiempo t . Cuando la burbuja toca la punta del sensor 0 en el punto espacial \bar{x}_0 , la ecuación que en el instante t_0 representa los puntos de la superficie será $f(\bar{x}_0, t_0) = 0$.

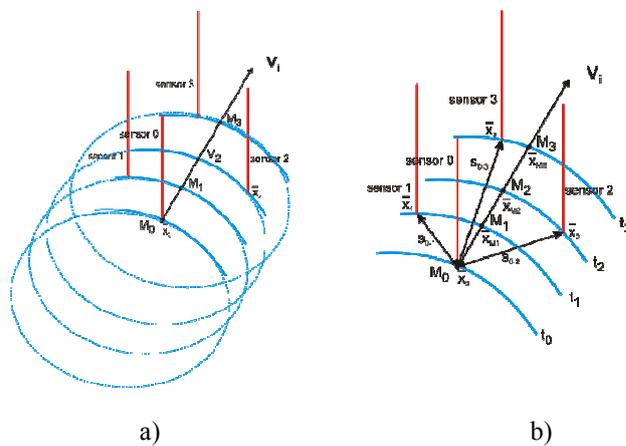


Figura 3.4 Interacción interfase de burbuja - sonda

Para cada punta k , la interfase tocará en distintos instantes de tiempo t_k de manera que podemos decir que $f(\bar{x}_k, t_k) = 0$ con $k=0, 1, 2, 3$, figura 3.4.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

En el instante t_0 la interfase intersecta al sensor 0 en el punto M de su superficie. La trayectoria de la burbuja hace que en el instante t_1 en el que la interfase intersecta con la punta del sensor 1, el punto M se encuentre en \bar{x}_{M_1} , y así sucesivamente para los cuales también se cumple que $f(\bar{x}_{M_k}, t_k) = 0$ por pertenecer a la superficie de la interfase. Ahora la distancia entre la punta del sensor 0 y el resto de puntas es:

$$\bar{s}_{0-k} = \bar{x}_k - \bar{x}_0 \quad (3.3)$$

La distancia entre la punta del sensor y el punto M cuando toca la interfase se define:

$$\bar{s}_{k-M_k} = \bar{x}_{M_k} - \bar{x}_k \quad (3.4)$$

Así como la distancia entre las sucesivas posiciones de M y el sensor 0 como:

$$\bar{s}_{0-M_k} = \bar{x}_{M_k} - \bar{x}_0 \quad (3.5)$$

De estas definiciones las tres distancias se relacionan de la manera siguiente como:

$$\bar{s}_{k-M_k} = \bar{x}_{M_k} - \bar{x}_k = (\bar{s}_{0-M_k} + \bar{x}_0) - (\bar{s}_{0-k} + \bar{x}_0) = \bar{s}_{0-M_k} - \bar{s}_{0-k} \quad (3.6)$$

Si la burbuja es suficientemente grande como para poder considerar que $|\bar{s}_{k-M_k}|$ es muy pequeña en comparación a la escala de la burbuja, lo que ocurre en la mayoría de los casos con diámetros de burbuja superior a 2 o 3 mm, se puede desarrollar por series de Taylor:

$$\underbrace{f(\bar{x}_k, t_k)}_0 = \underbrace{f(\bar{x}_{M_k}, t_k)}_0 + \nabla f(\bar{x}_{M_k}, t_k) \cdot \bar{s}_{k-M_k} + \underbrace{\dots}_0 \quad (3.7)$$

Donde se han despreciado los términos de orden igual o superior a 2, los dos primeros términos son cero por definición. Obtenemos para la superficie de la interfase:

$$\nabla f(\bar{x}_{M_k}, t_k) \cdot \bar{s}_{k-M_k} = 0 \quad (3.8)$$

3.3 Principio de medición

Si consideramos que $|\bar{s}_{k-M_k}|$ es muy pequeño debido a que $\Delta t_{0_k} = t_k - t_0$ es pequeño se asume que en el primer punto de contacto es:

$$\nabla f(\bar{x}_{M_k}, t_k) \approx \nabla f(\bar{x}_0, t_0) \quad (3.9)$$

Definiendo el vector unitario normal a la superficie de la interfase en el primer punto de intersección con el sensor 0 como:

$$\hat{n}_i = \frac{\nabla f(\bar{x}_0, t_0)}{|\nabla f(\bar{x}_0, t_0)|} \quad (3.10)$$

Es posible expresar (3.8) utilizando (3.6) como:

$$\nabla f(\bar{x}_{M_k}, t_k) \cdot \bar{s}_{k-M_k} = \nabla f(\bar{x}_{M_k}, t_k) \cdot (\bar{s}_{0-M_k} - \bar{s}_{0-k}) = 0 \quad (3.11)$$

Se obtiene:

$$\nabla f(\bar{x}_{M_k}, t_k) \cdot \bar{s}_{0-k} = \nabla f(\bar{x}_{M_k}, t_k) \cdot \bar{s}_{0-M_k} \quad (3.12)$$

Dividiendo (3.11) por $|\nabla f(\bar{x}_0, t_0)|$:

$$\hat{n}_i \cdot \bar{s}_{0-k} = \hat{n}_i \cdot \bar{s}_{0-M_k} \quad (3.13)$$

Dividiendo entre el tiempo que tarda la interfase en pasar del sensor 0 al sensor k, $\Delta t_{0_k} = t_k - t_0$:

$$\hat{n}_i \cdot \frac{\bar{s}_{0-k}}{\Delta t_{0_k}} = \hat{n}_i \cdot \frac{\bar{s}_{0-M_k}}{\Delta t_{0_k}} \quad (3.14)$$

Entonces, la velocidad real de avance de la interfase, \vec{V}_i y la velocidad medida, $\vec{V}_{m_{0k}}$ esta definida como:

$$\vec{V}_{m_{0k}} = \frac{\bar{s}_{0-k}}{\Delta t_{0_k}} \quad (3.15)$$

$$\bar{V}_i = \frac{\bar{s}_{0-M_k}}{\Delta t_{0_k}} \quad (3.16)$$

De (3.12) podemos decir que:

$$\hat{n}_i \cdot \bar{V}_{m_{0k}} = \hat{n}_i \cdot \bar{V}_i \quad (3.17)$$

Donde $\bar{V}_{m_{0k}}$ es la velocidad medida \bar{V}_i es la velocidad real de la interfase. La medidas que se obtienen son la distancia entre los sensores y el tiempo de retaso de la señal del sensor K al interceptar la interfase respecto al señal captada por el sensor 0 cuando paso por él y que proporciona una “velocidad medida”. La ecuación (3.17) indica la proyección la velocidad medida sobre el vector normal a la interfase en el punto de contacto del sensor 0 igual a la proyección del vector de la velocidad real de la interfase sobre el mismo vector unitario.

Lo anterior es cierto aún cuando la velocidad sea lateral y el primer sensor en tocar sea distinto que el sensor 0. A esto Mishima y colaboradores [Shen2005] llamaron teorema de la medida interfacial.

La figura 3.5 presenta la posición de los sensores respecto a la primera punta frontal (sensor 0).

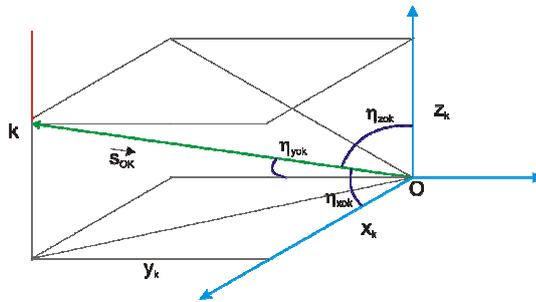


Figura 3.5 Posiciones de sensores respecto a punta frontal

Según este sistema de coordenadas, podemos expresar la distancia entre el origen de coordenadas, posición de la sonda 0 y la punta del sensor K como:

$$|\bar{s}_{0k}| = \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2} \quad (3.18)$$

3.3 Principio de medición

Los cosenos de los ángulos que forman como:

$$\cos \eta_{xok} = \frac{x_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}} \quad (3.19)$$

$$\cos \eta_{yok} = \frac{y_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}} \quad (3.20)$$

$$\cos \eta_{zok} = \frac{z_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}} \quad (3.21)$$

Podemos expresar el vector posición de la punta k como:

$$\vec{s}_{ok} = |\vec{s}_{ok}| \cdot (\cos \eta_{xok} \cdot \hat{i} + \cos \eta_{yok} \cdot \hat{j} + \cos \eta_{zok} \cdot \hat{k}) \quad (3.22)$$

Con lo que la velocidad medida puede expresarse como:

$$\vec{V}_{m_{ok}} = \frac{\vec{s}_{ok}}{\Delta t_{ok}} = \frac{|\vec{s}_{ok}|}{\Delta t_{ok}} \cdot (\cos \eta_{xok} \cdot \hat{i} + \cos \eta_{yok} \cdot \hat{j} + \cos \eta_{zok} \cdot \hat{k}) \quad (3.23)$$

Así, los cosenos y la distancia $|\vec{s}_{ok}|$ son medidas geométricas que se pueden obtener de la sonda cuando se fabrica y el incremento de tiempo que transcurre desde que toca la sonda 0 y la punta k se obtiene de la adquisición de datos. Para cada sensor podemos tener una ecuación:

$$\vec{V}_{m_{01}} = \frac{|\vec{s}_{01}|}{\Delta t_{01}} \cdot (\cos \eta_{x01} \cdot \hat{i} + \cos \eta_{y01} \cdot \hat{j} + \cos \eta_{z01} \cdot \hat{k}) \quad (3.24)$$

$$\vec{V}_{m_{02}} = \frac{|\vec{s}_{02}|}{\Delta t_{02}} \cdot (\cos \eta_{x02} \cdot \hat{i} + \cos \eta_{y02} \cdot \hat{j} + \cos \eta_{z02} \cdot \hat{k}) \quad (3.25)$$

$$\vec{V}_{m_{03}} = \frac{|\vec{s}_{03}|}{\Delta t_{03}} \cdot (\cos \eta_{x03} \cdot \hat{i} + \cos \eta_{y03} \cdot \hat{j} + \cos \eta_{z03} \cdot \hat{k}) \quad (3.26)$$

Por otro lado tenemos que:

Capítulo 3. Sonda de conductividad

$$\hat{n}_i \cdot \vec{V}_{m0k} = \hat{n}_i \cdot \vec{V}_i = V_n \quad (3.27)$$

Donde V_n es la proyección del vector velocidad real sobre el vector normal a superficie de la burbuja medida en el punto de toque de la burbuja que coincide con la proyección del vector velocidad medido. Suponiendo que la velocidad de la interfase no se ve influenciada por la presencia de la sonda y que durante el proceso de media no cambia de velocidad podemos decir que:

$$\hat{n}_i \cdot \vec{V}_{m01} = V_n \quad (3.28)$$

$$\hat{n}_i \cdot \vec{V}_{m02} = V_n \quad (3.29)$$

$$\hat{n}_i \cdot \vec{V}_{m03} = V_n \quad (3.30)$$

En las tres ecuaciones las velocidades medidas son conocidas, pero se desconocen la velocidad proyectada y el vector unitario.

$$\hat{n}_i = \cos \eta_x \hat{i} + \cos \eta_y \hat{j} + \cos \eta_z \hat{k} \quad (3.31)$$

Por la definición de cosenos directores:

$$\cos^2 \eta_x + \cos^2 \eta_y + \cos^2 \eta_z = 1 \quad (3.32)$$

El sistema de ecuaciones se cierra debido a que existen 4 incógnitas, $\cos \eta_x, \cos \eta_y, \cos \eta_z, V_n$ y 4 ecuaciones:

$$V_n = \hat{n}_i \cdot \vec{V}_{m01} = \frac{|\vec{s}_{01}|}{\Delta t_{01}} \cdot (\cos \eta_{x01} \cdot \cos \eta_x + \cos \eta_{y01} \cdot \cos \eta_y + \cos \eta_{z01} \cdot \cos \eta_z) \quad (3.33)$$

$$V_n = \hat{n}_i \cdot \vec{V}_{m02} = \frac{|\vec{s}_{02}|}{\Delta t_{02}} \cdot (\cos \eta_{x02} \cdot \cos \eta_x + \cos \eta_{y02} \cdot \cos \eta_y + \cos \eta_{z02} \cdot \cos \eta_z) \quad (3.34)$$

$$V_n = \hat{n}_i \cdot \vec{V}_{m03} = \frac{|\vec{s}_{03}|}{\Delta t_{03}} \cdot (\cos \eta_{x03} \cdot \cos \eta_x + \cos \eta_{y03} \cdot \cos \eta_y + \cos \eta_{z03} \cdot \cos \eta_z) \quad (3.35)$$

$$1 = (\cos \eta_x \cdot \cos \eta_x + \cos \eta_y \cdot \cos \eta_y + \cos \eta_z \cdot \cos \eta_z) \quad (3.36)$$

Que en forma matricial es:

$$\begin{bmatrix} \cos \eta_{x01} & \cos \eta_{y01} & \cos \eta_{z01} \\ \cos \eta_{x02} & \cos \eta_{y02} & \cos \eta_{z02} \\ \cos \eta_{x03} & \cos \eta_{y03} & \cos \eta_{z03} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \eta_x \\ \cos \eta_y \\ \cos \eta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{t_{01} - t_0}{s_{01}} \cdot V_n \\ \frac{t_{02} - t_0}{s_{02}} \cdot V_n \\ \frac{t_{03} - t_0}{s_{03}} \cdot V_n \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Llamando al determinante A_0 :

$$A_0 = \begin{vmatrix} \cos \eta_{x01} & \cos \eta_{y01} & \cos \eta_{z01} \\ \cos \eta_{x02} & \cos \eta_{y02} & \cos \eta_{z02} \\ \cos \eta_{x03} & \cos \eta_{y03} & \cos \eta_{z03} \end{vmatrix} \quad (3.38)$$

Aplicando la regla de Cramer:

$$\cos \eta_x = \frac{\begin{vmatrix} \frac{t_{01} - t_0}{s_{01}} \cdot V_n & \cos \eta_{y01} & \cos \eta_{z01} \\ \frac{t_{02} - t_0}{s_{02}} \cdot V_n & \cos \eta_{y02} & \cos \eta_{z02} \\ \frac{t_{03} - t_0}{s_{03}} \cdot V_n & \cos \eta_{y03} & \cos \eta_{z03} \end{vmatrix}}{A_0} = \frac{V_n \cdot A_1}{A_0} \quad (3.39)$$

Y de la misma forma:

$$\cos \eta_y = \frac{V_n \cdot A_2}{A_0} \quad \cos \eta_z = \frac{V_n \cdot A_3}{A_0} \quad (3.40)$$

Donde A_1 , A_2 y A_3 se definen como:

$$A_1 = \begin{vmatrix} \frac{t_{01} - t_0}{s_{01}} \cdot V_n & \cos \eta_{y01} & \cos \eta_{z01} \\ \frac{t_{02} - t_0}{s_{02}} \cdot V_n & \cos \eta_{y02} & \cos \eta_{z02} \\ \frac{t_{03} - t_0}{s_{03}} \cdot V_n & \cos \eta_{y03} & \cos \eta_{z03} \end{vmatrix} \quad (3.41)$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} \cos \eta_{x01} & \frac{t_{01} - t_0}{s_{01}} \cdot V_n & \cos \eta_{z01} \\ \cos \eta_{x02} & \frac{t_{02} - t_0}{s_{02}} \cdot V_n & \cos \eta_{z02} \\ \cos \eta_{x03} & \frac{t_{03} - t_0}{s_{03}} \cdot V_n & \cos \eta_{z03} \end{vmatrix} \quad (3.42)$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} \cos \eta_{x01} & \cos \eta_{y01} & \frac{t_{01} - t_0}{s_{01}} \cdot V_n \\ \cos \eta_{x02} & \cos \eta_{y02} & \frac{t_{02} - t_0}{s_{02}} \cdot V_n \\ \cos \eta_{x03} & \cos \eta_{y03} & \frac{t_{03} - t_0}{s_{03}} \cdot V_n \end{vmatrix} \quad (3.43)$$

De (3.31) podemos escribir:

$$\left(\frac{V_n \cdot A_1}{A_0} \right)^2 + \left(\frac{V_n \cdot A_2}{A_0} \right)^2 + \left(\frac{V_n \cdot A_3}{A_0} \right)^2 = 1 \quad (3.44)$$

Y de ahí obtener:

$$V_n = \frac{A_0}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}} \quad (3.45)$$

Donde todas las variables son conocidas, son datos geométricos o tiempos obtenidos de la adquisición de datos. Además podemos obtener los componentes del vector normal a la superficie de la burbuja en el punto de toque del sensor 0:

$$\hat{n}_i = \cos \eta_x \hat{i} + \cos \eta_y \hat{j} + \cos \eta_z \hat{k} \quad (3.46)$$

$$\cos \eta_x = \frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}} \quad (3.47)$$

$$\cos \eta_y = \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}} \quad (3.48)$$

$$\cos \eta_z = \frac{A_3}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}} \quad (3.49)$$

Y por tanto, obtener también el vector velocidad de la interfase.

$$\vec{V}_i = \frac{V_n}{\cos \eta_x} \hat{i} + \frac{V_n}{\cos \eta_y} \hat{j} + \frac{V_n}{\cos \eta_z} \hat{k} \quad (3.50)$$

c) Distribución del número de burbujas

La distribución del número de burbujas se obtiene simplemente del número de veces que una burbuja toca un sensor a lo largo del recorrido radial r/R de la sonda de conductividad. Sólo son tomadas en cuenta las señales obtenidas de la punta larga de la sonda.

d) Tamaño de burbuja

Estrictamente hablando la hipótesis de que la burbuja es esférica es errónea, pues difícilmente se cumple esta condición en la realidad, sin embargo mediante el empleo del sistemas de visión artificial se ha comprobado que las burbujas aún con una forma elíptica con eje mayor 2 veces mas grande que el radio de una burbuja esférica detectadas por la sonda tienen una gran similitud entre si [Hibiki1998], por ello esta hipótesis aunque errónea en la vida real para los efectos de medida funciona adecuadamente. El tamaño de la burbuja esférica o Sauter (D_{sm}), puede expresarse como función de la concentración de área interfacial promedio en el tiempo y la fracción de huecos:

$$D_{sm} = 6 \frac{\alpha}{a_i} \quad (3.51)$$

La información respecto al tamaño de la burbuja detectada por la sonda es separada en grupos, donde el primer grupo lo representan burbujas con forma esférica y el grupo 2 con burbujas que no lo son.

El parámetro empleado para discriminar la forma de burbuja es la longitud de cuerda de las burbujas, cuando esta superaba el valor de 40 eran consideradas como burbujas cap y no bubbly. Algunos autores emplean el criterio de diámetro crítico.

e) Concentración de área Interfacial

La ecuación básica se deriva de las siguientes hipótesis: i) el número de interfases que golpean al sensor es muy grande, ii) la velocidad interfacial es estadísticamente independiente del ángulo entre la dirección principal del flujo (dirección vertical ascendente) y la dirección normal de la j-esima interfase, iii) la interfase esta compuesta por burbujas esféricas, iv) la sonda detecta el paso de cualquier burbuja con igual probabilidad, v) las componentes en las direcciones transversales x-y son aleatorias. A continuación se define el método por el cual a concentración de área interfacial es obtenida a partir de la señal eléctrica proporcionada por la sonda de conductividad. De la definición de densidad de área interfacial propuesta por Ishii [Ishii1975]:

$$\bar{a}_j(x_0) = \frac{1}{\Omega} \sum_{i=1}^N \frac{1}{|\bar{V}_i \cdot \hat{n}_i|} \quad (3.52)$$

Ha sido demostrado matemáticamente que la concentración de área interfacial, a_i es función de la media armónica de la velocidad interfacial [Kataoka1986]. Es fácil obtener una expresión para este parámetro basado exclusivamente en datos geométricos y los tiempos del sistema de adquisición:

$$\bar{a}_j(x_0) = \frac{1}{\Omega} \sum_{i=1}^N \frac{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}}{A_0} \quad (3.53)$$

Donde x_0 es el punto de toque con el sensor 0 y N es el número de interfases detectadas y Ω es el intervalo de tiempo en el que se han detectado las N interfases.

Dongjian y colaboradores [Dongjian2005] evaluaron a partir de las mismas señales obtenidas de una sonda de dos puntas modelos estadísticos para la concentración de área interfacial de varios autores, encontraron que el modelo de Kataoka [Kataoka1994] se ajustaba mejor.

f) Factores de corrección

El empleo del sensor de conductividad esta basado en los supuestos de la existencia de burbujas con forma esférica y que la componente de la velocidad de burbuja medida representa la velocidad real de la burbuja, por ejemplo. Dichas suposiciones son estrictamente válidas sólo en situaciones muy puntuales, para evitar errores de interpretación y en la obtención de medidas confiables son empleados algunos factores de corrección, este proceso de corrección ha sido empleado por varios autores [Wu2001] [Muñoz-Cobo2007]. Se trata de multiplicar los valores obtenidos por factores de corrección que tengan en cuentas las desviaciones desde las condiciones ideales de medida.

En este estudio emplearemos el trabajo de desarrollado durante esta tesis y liderado por el profesor Muñoz-Cobo y que consiste en la obtención de parámetros de calibración para la concentración de área interfacial y de la velocidad interfacial de burbuja. En dicho trabajo fueron desarrollados cálculos en la obtención de factores de corrección para valores de diferentes distancias $\Delta S/D$, donde D es el diámetro de burbuja y ΔS es la distancia entre sensores, y diferentes valores de parámetro H_{max} , (ecuación 3.54) que es el cociente entre la fluctuación máxima de la velocidad de la burbuja, parámetro V' y la velocidad media de la burbuja. Para ello fue necesaria la realización de simulaciones teóricas basadas en modelos de Monte-Carlo para la distancia $\Delta S/D$ y para una distribución normal del tamaño de burbujas.

$$H = \frac{V'}{\bar{V}} \quad (3.54)$$

El valor medido de la velocidad V_m depende del tiempo que tarda la superficie de la burbuja en tocar la punta larga y corta, ecuación 3.55 ,donde Δt_{front} es el lapso de tiempo que transcurre entre que la burbuja toca la primera y la segunda punta ($t_{front} = t_{larga} - t_{corta}$). Si la burbuja se mueve con una dirección paralela a la orientación de las puntas el valor medida de velocidad representa la velocidad real de la burbuja. Sin embargo, debido a la existencia de fluctuaciones de la velocidad en sus componentes laterales como respuesta a la turbulencia de la fase líquida, la medida de la velocidad real de la burbuja se vuelve un tanto complicada.

$$V_m = \frac{\Delta S}{\Delta t_{front}} \quad (3.55)$$

El efecto más común del movimiento lateral de la burbuja sobre la velocidad medida se hace presente cuando las puntas tocan a la interfase con una distancia equivalente menor a ΔS , figura 3.6. En el caso mostrado en la figura 3.6.b el tiempo que transcurre entre ambas señales será menor y con ello la velocidad medida será mucho mayor que la velocidad medida. Para paliar este defecto se ha definido un factor de calibración f_v como la relación entre el valor medio y el valor medido de la velocidad de la interfase de la burbuja, mismo que debe ser menor a 1. Un caso extremo se este efecto es que la burbuja toque simultáneamente o en un lapso de tiempo sumamente corta a ambas puntas.

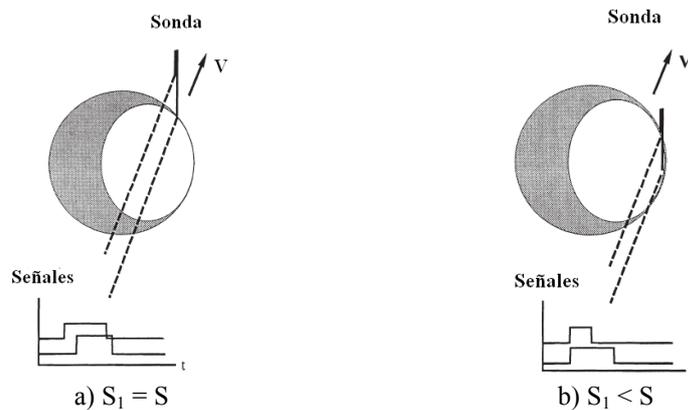


Figura 3.6 Efecto del moviendo lateral de la burbuja sobre la Velocidad medida

Cuando se incrementa el valor de H las componentes laterales de la velocidad de la interfase se hacen más importantes incrementando con ello la probabilidad de que la burbuja toque solo una punta. Del mismo modo ante un incremento de $\Delta S/D$ para una H dado, el número de burbujas perdidas o No-Efectivas, N_{miss} , se incrementa debido al aumento de la distancia S que puede originar que la burbuja toque solo la punta larga pero durante el recorrido de la distancia S puede ocurrir que la fluctuación la componente lateral de la velocidad impida que la superficie de la burbuja toque la punta corta. La figura 3.7 muestra que el número de burbujas perdidas, *missing*, o burbujas que sólo producen un toque en alguno de los sensores, aumenta linealmente con el valor de H_{max} , para un valor de $\Delta S/D$ dado. Se observa que el factor de calibración f_v disminuye conforme aumenta la fluctuación de la velocidad, sin embargo es dependiente de la relación entre S y D , donde $D = 3\text{mm}$.

3.3 Principio de medición

Podremos decir entonces que el factor de calibración tiene un valor de $f_v \sim [0.99-1]$ para valores $\Delta S/D > 0.5$ y $H_{max} < 0.2$, en otras circunstancias debe tenerse especial cuidado en seleccionar el factor de calibración adecuado.

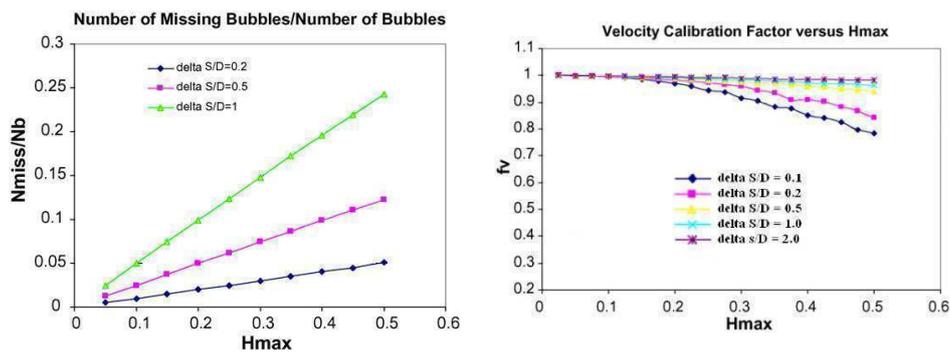


Figura 3.7 Burbujas Missing y la fluctuación de la velocidad

También se ha realizado el cálculo de la variación de los valores esperados de los factores de calibración para la medida de la concentración de área interfacial. Para ello son definidos tres factores de corrección para la aportación de las burbujas efectivas $f_{a,normal}$, no-efectivas o *miss bubbles* $f_{a,miss}$, y un factor de calibración total $f_{a,tot}$. En la relación $\Delta S/D$ se asume constante la separación entre puntas mientras que el diámetro es evaluado en distintos valores. En la figura 3.8 se observa que el factor de corrección para el área interfacial de burbujas normales o efectivas decrece a medida que aumenta la relación $\Delta S/D$, esto indica que la fluctuación de la velocidad se hace importante en los caos extremos.

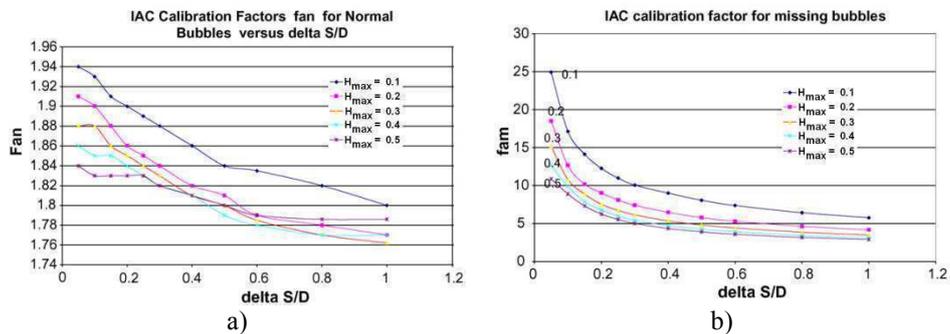


Figura 3.8 Factores de corrección para el área interfacial de burbujas efectivas o normales y burbujas no-efectivas o *Missing bubbles*

Capítulo 3. Sonda de conductividad

La figura 3.8.b muestra el factor de corrección para el área interfacial de burbujas no-efectivas, se observa que es muy alto el factor de corrección para valores bajos de la relación $\Delta S/D$ y H_{max} , ello es debido a que el ángulo entre el vector normal y la dirección de la velocidad se aproximan a $\pi/2$ ello indica una fuerte componente lateral de la burbuja que origina un incremento en el numero de burbujas no-efectivas considerables. Por otro lado, sí la relación entre separación de puntas y diámetro de burbuja aumenta el factor de corrección decrece, lo mismo sucede para incrementos de H_{max} debido ello a que un aumento en la fluctuación de la velocidad implica una componente lateral de la velocidad altamente dominante. La figura siguiente muestra que el factor de calibración total es muy próximo a 2, de modo que podríamos decir que este valor es válido para las condiciones que cumplan la condición $\Delta S < D < 2.8\Delta S$.

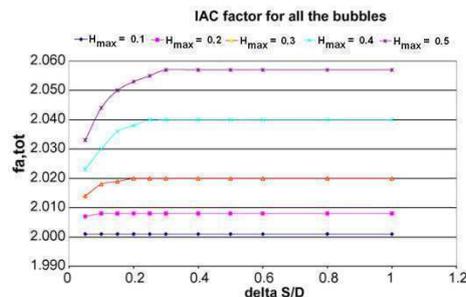


Figura 3.9 Factores de corrección para el área interfacial de burbujas total

3.4 Construcción

Esta sección describe el proceso de selección de materiales, procesos de fabricación, el proceso de ensamble final y las dimensiones del prototipo empleado. En el apartado siguiente se expone el diseño del circuito eléctrico necesario para su funcionamiento, el cableado y el control de ruido eléctrico.

3.4.1 Selección de materiales y procesos

En la construcción de la sonda de conductividad fueron realizadas infinidad de pruebas orientadas a la obtención de durabilidad en un ambiente excesivamente húmedo, el diseño de un método de ensamblaje de los componentes viable, una configuración geométrica confiable y un proceso de fabricación sólido ante la variabilidad del control dimensional debido a que el método de fabricación es manual.

a) Selección del sensor/punta

Como primera acción se estudiaron algunos modelos de agujas de acupuntura como candidatos a sensores o puntas en la sonda de conductividad.

Se escogieron 3 tipos distintos de agujas de acupuntura y fueron evaluadas sus dimensiones geométricas y la facilidad para ser unida a un conductor de cobre. La tabla siguiente muestra estas primeras evaluaciones, en todos los casos las agujas están hechas de acero inoxidable. En la tabla el número referencia es el número con el cual lo identifica el fabricante (NOVASAN).

3.1 Agujas de acupuntura evaluadas

Modelo	Recubrimiento	Diámetro x Longitud [mmxmm]	Respuesta corrosión
NR1987	No recubierto	0.35x150	Excelente
EQ1037	Plata	0.32x150	Buena
EQ1902	Oro	0.26x40	Buena

b) Unión sensor cable

Es necesario unir eléctricamente la aguja con un cable conductor, dicha unión puede ser realizada de manera mecánica por medio de un casquillo o puntera hueca (RS 157-1216) con un diámetro interior de 0.8mm de cobre estañado, el cual es prensado. Con este método de unión existe el riesgo de desprendimiento del hilo conductor además posee una complejidad añadida en cuanto al aislamiento eléctrico de dicha unión ya que las aristas y vértices muy agudos no llegan a ser cubiertos por el barniz aislante, o es en esas zonas donde el recubrimiento es muy débil y ante la fricción con la pared del tubo de acero inoxidable que lo aloja puede desprenderse, además existe un considerable aumento en el tamaño de la unión.

Otro método probado sin éxito fue empelar un adhesivo conductor (epóxido conductor con limadura de plata CW2400 de Circuit Works), es demasiado costoso y de difícil aplicación, además requiere un largo tiempo de secado que sobrepasa las 8 horas. Un tercer método es emplear soldadura (si el metal esta recubierto con oro o plata) que es un método más económico y con mejores propiedades mecánicas, el principal inconveniente es su aplicación ya que es necesario un buen control dimensional y una gran experiencia por parte del constructor, también requiere de una limpieza exhaustiva para remover cualquier residuo grasa de la superficie y que no interfiera en el aislamiento eléctrico.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

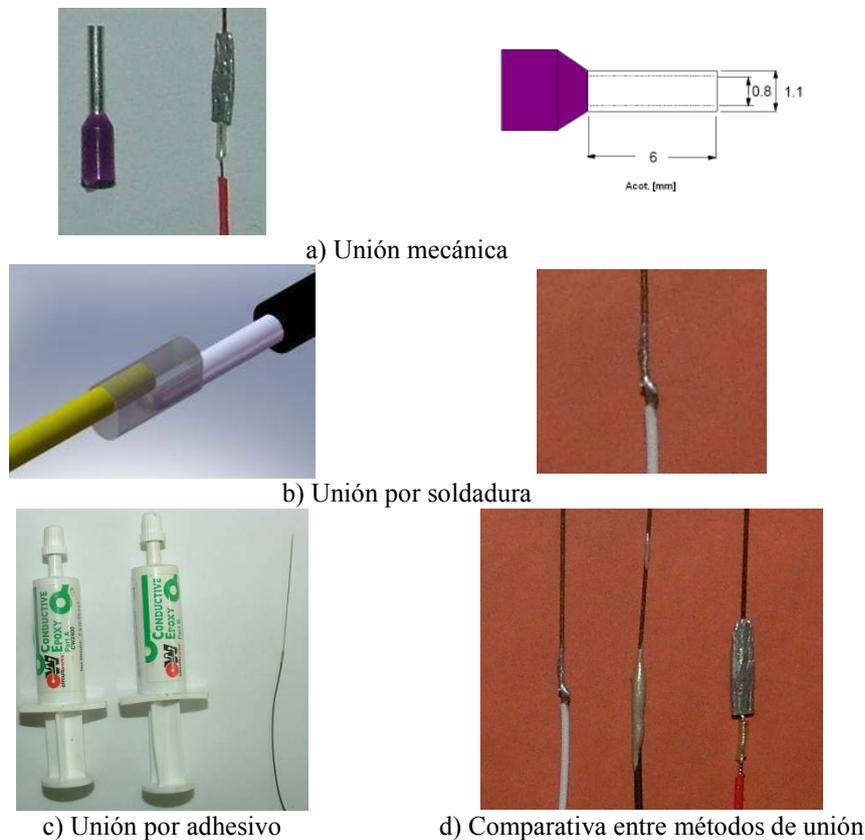


Figura 3.10 Unión aguja-cable

La figura 3.10 muestra éste método de unión y otros dos que fueron empleados en la unión de la aguja de acupuntura y el cable conductor. En cuanto a la aplicabilidad de los métodos antes descritos, para las agujas modelo NR1987 se requería un cuidado especial en cuanto al método de unión entre el cable y el cuerpo de la aguja ya que la soldadura fue descartada debido a que no es fácil unir el acero inoxidable con el cable mediante unión con soldadura bajas temperaturas. Los modelos EQ1037 y EQ1902 al estar bañados en plata y oro respectivamente no presentaron problema alguno con la unión mediante soldadura.

3.2 Método de unión aguja-cable

Modelo	Recubrimiento	Diámetro x Longitud [mmxmm]	Método de Unión
NR1987	No recubierto	0.35x150	Mecánico
EQ1037	Plata	0.32x150	Soldadura
EQ1902	Oro	0.26x40	Soldadura

3.4 Construcción

La unión puede ser realizada con una grapa (Terminal), con soldadura (si el metal es oro o plata) o con adhesivo conductor. La finalidad es unir eléctricamente la aguja con un cable. El uso de grapas resulta incómodo al momento de aislar la unión, con la soldadura es necesario limpiar de toda grasa la superficie a aislar, el mejor método es el empleo de adhesivo conductor pero posee el inconveniente de tener un alto costo, además requiere un largo tiempo de espera en el secado.

De lo anteriormente descrito se eligió el modelo de agujas de acupuntura EQ1902 unida mediante soldadura debido a que representa una fuerte resistencia a la corrosión y después de horas de práctica fue posible obtener una soldadura firme y de reducidas dimensiones.

c) Cable conductor

En un principio se emplearon hilos de termopar tipo T de cobre-constantán de 0.5mm de diámetro como cable conductor, sin embargo al momento de conectarlos eléctricamente su respuesta era muy irregular.

Posteriormente se empleo cable de cobre calibre 28wg que era muy grande, después cable 32awg recubierto con barniz muy frágil con un amplio uso en la industria eléctrica, sin embargo pierde fácilmente el aislamiento que lo cubre. También se realizaron pruebas con cable 30awg pero era muy difícil lograr una soldadura de reducidas dimensiones, por ultimo se empleo un alambre de cobre chapado en plata de 0.25mm de diámetro con aislamiento de Kynar (termoplástico fluoro-polímero). Este fue el mejor conductor eléctrico que fue probado, razón por la cual se emplea actualmente en la fabricación del prototipo final.

d) Aislamiento superficial dieléctrico de la aguja

La tabla 2.3 muestra las principales características de los recubrimientos dieléctricos evaluados. El primer criterio de selección fue el método de aplicación pues se desean superficies suaves, en capas delgadas y de dureza suficiente que resista el proceso de ensamble; el segundo criterio fue la resistencia a la humedad pues estará sumergido durante grandes períodos de tiempo en agua.

3.3 Barniz de recubrimiento

Nombre	Aplicación	R. humedad	Dieléctrico
Royalac 128	Inmersión, Buena	Regular	Buena
Plastik 70	Spray, Mala	Buena	Buena
Urethane	Inmersión, Buena	Buena	Buena
Polyurethane RS	Inmersión, Regular	Regular	Regular
Aropol	Inmersión, Mala	Buena	Buena
Barniz RS	Inmersión, Buena	Mala	Regular

Capítulo 3. Sonda de conductividad

Fueron probados dos métodos distintos de aplicación del recubrimiento aislante en las agujas. Uno de ellos consiste en sumergir la aguja en barniz aislante y retirar lentamente, esperar a que el barniz este parcialmente seco para sumergirlo nuevamente hasta en 3 ocasiones, espaciadas entre sí el tiempo suficiente para que el recubrimiento superficialmente se encuentre seco, éste el método más sencillo, fácil y rápido. El segundo método probado y desechado posteriormente es aplicar el barniz en forma de spray, este método no proporciona una buena distribución del barniz sobre la superficie de la guja provocando una superficie irregular, zonas descubiertas y formación de gotas indeseables.

Las propiedades dieléctricas del material aislante son muy parecidas entren si, sin embargo la señal que se recibe en el sistema de adquisición de datos es de mejor o peor calidad dependiendo el barniz empleado Se eligió como barniz aislante el Urethane debido a la combinación de sus propiedades.

Una mejor opción parecía ser el Plastik 70 sin embargo su único método de aplicación es muy incomodo e irregular ya que solo se vende en presentaciones en spray y no es posible aplicarse en el proceso de inmersión. Otra buena alternativa es el Aropol sin embargo la aplicación por inmersión es sumamente difícil dada su alta viscosidad. El urethane empleado como recubrimiento aislante requiere de una temperatura de curado de 60°C durante 4 horas, aunque puede secarse a temperatura ambiente requiere de 24 horas para un secado total. La figura 3.11 muestra dentro del horno algunas sondas una vez que han sido ensambladas.



Figura 3.11 Sondas de conductividad dentro del horno de secado

e) Aislamiento de unión

En la zona de la unión por soldadura fue empleado el mismo barniz con el que fue recubierta la punta. La finalidad de éste aislamiento es evitar el contacto eléctrico entre la pared interna del tubo de acero inoxidable con las agujas y el cable conductor.

En un principio se empelaba una funda termo-retráctil pero el control dimensional era pésimo debido a que no existen artículos de este tipo de dimensiones tan reducidas. Actualmente se emplea una cinta de teflón a modo de cinta aislante, el reducido espesor de la cinta (0.1mm) no incrementa sustancialmente el tamaño de la unión y asegura sin lugar a duda el total aislamiento eléctrico entre las agujas, la unión cable-aguja y el interior del tubo de acero inoxidable.

f) Ensamble de las puntas

La distancia entre las puntas se fija comúnmente en 2.2 mm ya que la literatura y la experiencia adquirida indica que esta distancia se encuentra 1.5 y 2 veces el radio de burbuja esperado.

En los primeros prototipos la separación entre las agujas se mantiene fija con la ayuda de un tubo cerámico empleado en cromatografía de diámetro exterior de 2.36mm y que posee cuatro orificios internos muy pequeños con 0.38mm de diámetro separados una distancia calibrada de 0.25 mm entre centros. Este método fue empleado durante todas las pruebas preliminares.

Con la finalidad de reducir el área de medida del sensor y mejorar su control dimensional se probó doblar las agujas para reducir la distancia entre ellas, esto fue muy difícil, impreciso y costoso en cuanto a tiempo, además provocaba en la mayoría de los casos que el barniz se desprendiera de la superficie de la aguja o que ésta se dañara.

Posteriormente se diseñó un sistema que permitiera prescindir del tubo cerámico, proporcionara diferentes arreglos dimensionales y fuera un sistema fiable en cuanto a la calibración de las distancias de las puntas. Este sistema consiste en la construcción de un patrón en el cual se realizan pequeños orificios con un diámetro interior (0.4mm) cercano al diámetro de las agujas una vez barnizadas (0.3mm). La figura 3.12 muestra los sistemas de control dimensional que fueron evaluados en la construcción de la sonda.

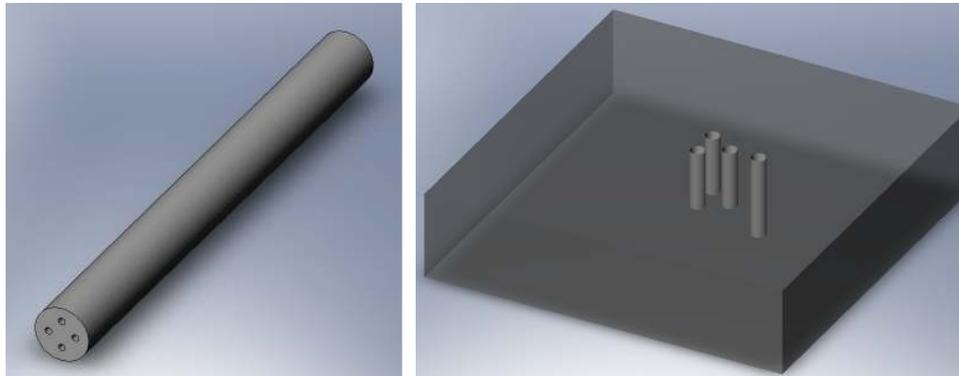


Figura 3.12 Plantillas de configuración geométrica

Los orificios están configurados en distancias y geometrías deseadas por el usuario de manera que las agujas son introducidas en los orificios, se agrega adhesivo que las mantiene en esa posición y posteriormente es extraído todo el conjunto. Con este método es posible construir casi cualquier arreglo dimensional de las sondas, la única limitante es que la dimensión más pequeña posible es 0.4mm debido a que no contamos con portaherramientas que soporte herramientas de corte inferiores a 0.4mm de diámetro.

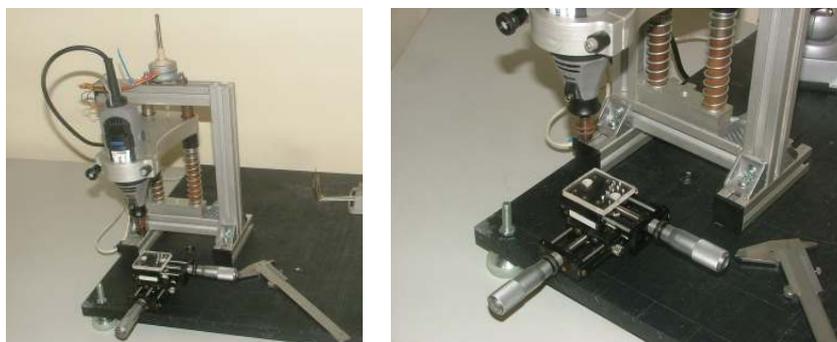


Figura 3.13 Micro-taladradora V1 controlada por ordenador

La figura precedente muestra la maquina construida para fabricación de los patrones dimensionales. Se observa una estructura de aluminio que da rigidez al sistema, una maquina taladradora de velocidad variable cuyo porta brocas permite la sujeción de herramientas a partir de 0.4mm de diámetro. Posee dos motores eléctricos controlados desde el ordenador que permiten establecer la profundidad y orientación del corte, esta profundidad es la separación axial (z) de las puntas larga y corta.

3.4 Construcción

La precisión dimensional en el plano x-y se obtiene gracias a dos mesas o carros deslizantes acoplados a dos micrómetros con precisión de 0.025mm. La figura 3.14 muestra la última versión de esta máquina.

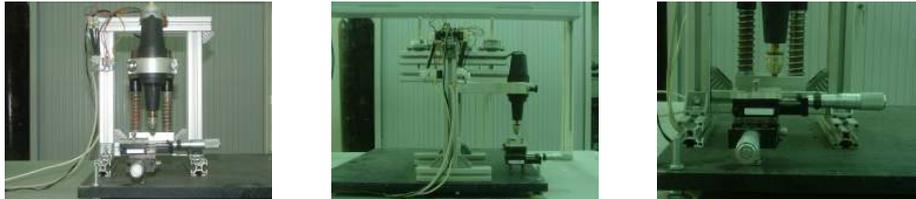


Figura 3.14 Micro-taladradora V2 controlada por ordenador

Las velocidad de corte así como la profundidad esta controlada por un programa realizado en Labview y por un circuito eléctrico que recibe la orden mediante pulsos eléctricos desde las tarjetas de adquisición de datos y los traduce en la sincronización de la alimentación eléctrica del motor. Originalmente se empleaba un taladro eléctrico pequeño Dremel, aunque se desconoce la velocidad de rotación a la que trabaja, se realizaron pruebas exhaustivas para ajustar la velocidad de corte ya que si es demasiado baja la calidad es mala y las herramientas se rompen fácilmente.

Por otro lado si la velocidad de corte es elevada existe un sobrecalentamiento del material a grado tal que llega a fundirse y al solidificar ensucia a la herramienta de corte, además el control adimensional es pobre. En la última versión se encontró una herramienta con alimentación eléctrica en corriente continua que debe ser alimentada con 9.5vdc. El avance de corte en la dirección vertical debe ser 15 pasos por segundo equivalente a 0.38mm/s. Aunque no fue empleado fluido de corte, se empleo aire comprimido para enfriar el material, para cortar la viruta y limpiar la herramienta mientras trabaja. Con el empleo de esta maquina el control dimensional de la sonda mejora considerablemente.

g) Ensamble en el cuerpo de acero inoxidable

Este tubo de acero inoxidable posee un diámetro exterior de 3mm y su finalidad es proporcionar el contacto eléctrico con el medio fluido y la masa eléctrica del sistema, además de proporcionar rigidez mecánica a la sonda. En su interior son introducidos los conductores ya unidos a las agujas (previamente aislados), por un extremo sobresalen las agujas y por el otro el sensor. Los primeros prototipos estaban instalados en un tubo de acero inoxidable con diámetro exterior de 6 mm y 1 mm de espesor de pared, el tamaño era mucho mayor.

h) Punta cono

Permite la terminación en forma cónica del cuerpo cilíndrico, además de evita la entrada de líquido al interior del tubo de acero inoxidable. El material empleado en esta terminación es el Adopol mencionado anteriormente que es un polímero epóxico que se obtiene al mezclar dos compuestos, conforme solidifica va cambiando su viscosidad permitiendo conformarlo cónicamente. En un principio se empleo adhesivo de masilla epóxica de dos componentes, el principal problema era el control dimensional ya que es muy agresivo al momento de ser aplicado debido a que se moldea con los dedos para que adquiriera la forma cónica.

3.4.2 Proceso de ensamble

El ensamble del sensor tiene una duración aproximada de *16 horas*. La duración del proceso es en gran parte debida a tiempos de espera para el secado del barniz y de los adhesivos empleados. A continuación se describe dicho proceso.

A. Unión con el conductor

El primer procedimiento es realizar la unión del cable conductor con la aguja de acupuntura mediante soldadura. Este procedimiento es uno de los mas complicados debido a que es fundamental una buena destreza del constructor para lograr una soldadura pequeña, fuerte y conductora. Se emplean agujas comerciales de acupuntura, de acero inoxidable bañadas en oro, con diámetro de 0.26mm y 40mm de longitud.

B. Aislamiento de aguja

Posteriormente se realiza la limpieza superficial de la unión aguja-cable, se aplica alcohol etílico. La aguja es sumergida en el recubrimiento hasta la completa cobertura de la unión soldada invadiendo incluso el recubrimiento del cable conductor, a continuación se introduce en un horno a 60C durante 2 horas, al termino de las cuales se repite el proceso de inmersión y su introducción hasta completar 3 inmersiones, después de la ultima inmersión se mantiene en el horno durante 4 horas.

C. Configuración geométrica

Empleando el patrón de configuración geométrica, se introducen las agujas en los orificios correspondientes y se aplica adhesivo para mantener dicha configuración. Debe ser preciso que se compruebe la correcta disposición de las puntas en los orificios.

D. Aislamiento de unión

La finalidad de este proceso es evitar el contacto eléctrico entre la pared interna del tubo de acero inoxidable con la unión soldada aguja – conductor, aunque se realizó el aislamiento por inmersión de dicha unión se ha comprobado que debido a la forma de la unión y algunas superficies agudas en ocasiones el aislamiento no llega a ser total, por ello se emplea cinta teflón para reforzar el aislamiento además evitar que las uniones se toquen entre sí.

E. Introducción en el cuerpo cilíndrico

Se introduce el conjunto de las agujas ya unidas en el interior del tubo de acero inoxidable perfectamente doblado a 90° y comprobada su perpendicularidad.

F. Punta cono

Se aplica adhesivo para dar forma a la punta al mismo tiempo que se consigue un cambio suave de sección desde el diámetro del tubo hasta las agujas. También evita la entrada de líquido al interior del tubo de acero inoxidable.

3.4.3 Dimensiones del prototipo empleado

La figura 3.15 muestra las dimensiones del prototipo empleado en la ejecución de los experimentos. En la figura 2.15.a es mostrada una longitud horizontal de 240mm en la sonda, esta longitud es empleada por el sistema de posicionamiento para sujetar a la sonda, mientras que la longitud vertical de 60mm busca evitar perturbaciones en el flujo y en el movimiento de la burbuja.

Se observa, en la figura 2.15.b que las sondas cortas (de color gris) forman un triángulo equilátero de 0.45mm de lado, mientras que la distancia entre la punta larga (de color rojo) se encuentra a 0.4mm en la dirección radial co-lineal a la bisectriz que corta al ángulo de la punta más cercana. Este arreglo geométrico de las puntas que llamaremos FOXA fue empleado en la mayoría de los experimentos que se realizaron, en solo algunos casos se empleó una geometría distinta en la cual la punta larga se encuentra en el centro del triángulo equilátero, de las mismas dimensiones, geometría llamada FOX.

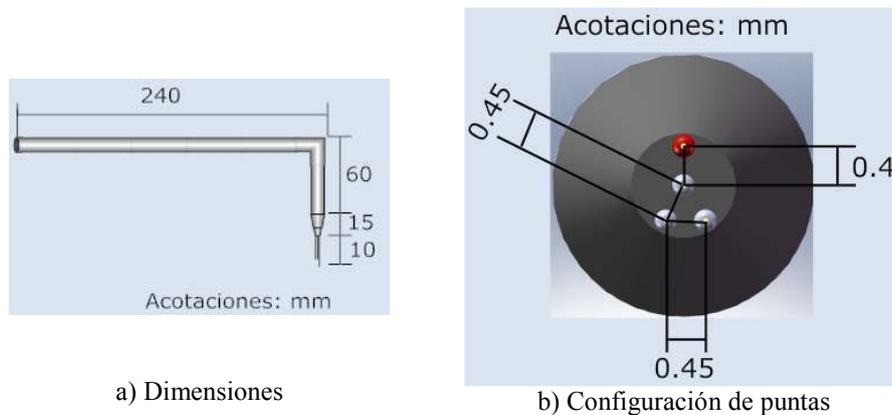


Figura 3.15 Sonda de Conductividad

3.4.4 Circuito, cableado y control de ruido electricos

3.4.4.1 Circuito eléctrico

El objetivo del circuito es suministrar la corriente y tensión necesarias para alimentar la sonda y al mismo tiempo acondicionar la señal para que mediante la adquisición de datos se obtenga una señal eléctrica de buena calidad. Se analizaron dos prototipos de los cuales solo se detalla el segundo el cual es el que se emplea actualmente.

a) Prototipo 1

Este circuito, el primero que se construyó, es empleado en la alimentación de dos sensores en la sonda. En este circuito se emplea una resistencia limitadora de la corriente, la resistencia variable y la sonda. Para conocer los valores de resistencias, tensiones e intensidades del circuito partimos nuevamente de la ley de Ohm, y de una configuración paralela cuya resistencia equivalente es la expresión 3.56.

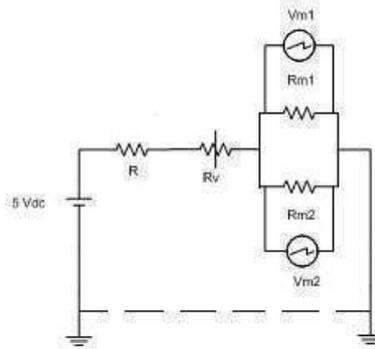


Figura 3.16 Circuito prototipo 1

$$1/R_{eq} = 1/R_{m1} + 1/R_{m2} \quad (3.56)$$

La resistencia total del circuito es:

$$R_T = R + R_V + R_{eq} = R + R_V + (1/R_{m1} + 1/R_{m2})^{-1} \quad (3.57)$$

En este caso, los valores nominales de las resistencias (R y R_V) son los mismos al igual que el valor de la tensión de alimentación. La tensión de medida cambiará así como la intensidad del circuito en la parte paralela.

Este circuito ocasionaba una gran interferencia entre señales debido a un acoplamiento entre ellas, en gran parte debido a que la alimentación común se ve fuertemente influenciada por la resistencia R_{m1} y R_{m2} .

b) Prototipo 2

Se construyó un circuito que funciona alimentado con una fuente de 5Vdc, en un principio se empleaba la fuente de 5Vdc que tiene integrada la tarjeta de adquisición de datos pero el ruido en la señal afectaba la calidad de las mediciones; posteriormente se instaló un transformador y un circuito rectificador pero el rizado en la señal de alimentación de la sonda generaba aún más errores. La solución final fue adquirir una fuente de laboratorio altamente estable y precisa.

La fuente de alimentación permite detectar los cambios de la señal eléctrica debida al cambio del medio líquido-gas en un rango de 2.5 a 5Vdc. Se probaron algunas configuraciones y tras un breve estudio se eligió el presente prototipo. Es necesario disponer de un circuito eléctrico para cada punta en la sonda de conductividad. La figura 3.18 muestra un esquema del circuito eléctrico.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

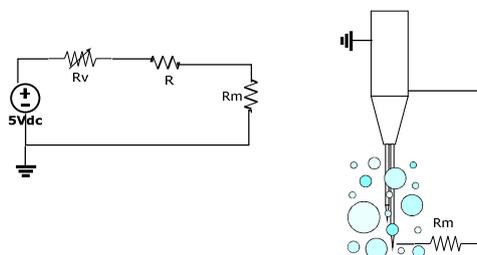


Figura 3.17 Circuito eléctrico prototipo 2

Se observa una resistencia ($R=100\text{ k}\Omega$) que tiene por objeto limitar el paso de corriente en el circuito. La resistencia variable ($R_v=0-100\text{ k}\Omega$) tiene por objeto permitir el ajuste de la señal a un valor determinado por ejemplo 2.5Vdc, por último se encuentra una resistencia de medida R_m que representa la resistencia debida al medio fluido (liquido o gas) que esta presente en la punta, en la figura de la derecha se ejemplifica el significado de R_m que eléctricamente tendría el mismo efecto que el de una resistencia en serie con un valor determinado para las fases líquida y gas. La figura siguiente muestra una imagen del circuito construido y empleado para la alimentación, acondicionamiento de la señal y la adquisición de datos de la sonda. Se instaló dicho circuito dentro de una caja de polipropileno, los conectores eléctricos empleados fueron seleccionados para evitar cualquier error en su conexión y provocar daños en las tarjetas electrónicas de adquisición de datos.

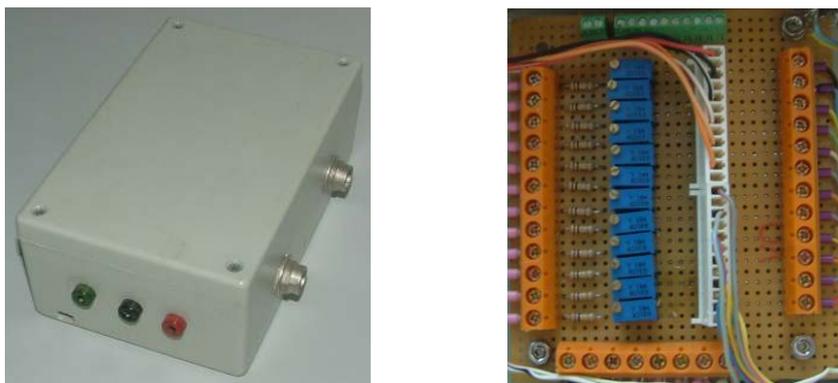


Figura 3.18 Circuito eléctrico construido empleado

A partir de la ley de Ohm:

$$V = RI \tag{3.58}$$

Para las resistencias que se encuentran en serie:

$$I = I_R = I_v = I_m = Cte \tag{3.59}$$

$$V = \sum V_i = V_R + V_v + V_m \tag{2.60}$$

$$R = \sum R_i = R_R + R_v + R_m \tag{3.61}$$

Donde V_m es la tensión entre las puntas del sensor (o de la aguja referida a tierra). Si la resistencia de medida (ya sea agua o aire) cambia, lo hace también el valor de la tensión y esa es la señal que es captada por la adquisición de datos.

3.4 Medidas eléctricas en el circuito

Variable	Valor _{Nominal}	Unidad
R	100	KΩ
R _v	0 – 100	KΩ
V	5	Vdc
R _{Rm} (aire)	Infinito	Ω
R _{Rm} (agua)	50	KΩ
I	25	μA

La tabla anterior muestra los valores de las variables eléctricas medidas. Cuando el medio fluido es aire, R_m tiene un valor muy alto lo cual se interpretaría como un circuito abierto (R_{Rm} infinita) mientras que en presencia de agua la resistencia no sería tan alta (50 KΩ aprox.).

Lo anteriormente expuesto permite cuantificar el cambio del medio fluido en la punta mediante el cambio de la tensión en el sensor. Con los datos anteriores, en condiciones ideales de operación el valor R_{Rm} debe ser:

$$V = R_T I = (R_R + R_{Rv} + R_{Rm}) I \tag{3.62}$$

$$R_{Rm} = V/I - (R_R + R_{Rv}) \tag{3.63}$$

La resistencia R_m no es igual para el agua ni para el aire. Se realizaron medidas experimentales y se determinaron los siguientes valores medidos para la punta larga:

Capítulo 3. Sonda de conductividad

3.5 Medidas eléctricas de la resistencia del medio R_m

<i>Agua</i>			<i>Aire</i>		
Variable	Valor	Unidad	Variable	Valor	Unidad
V	5.07	Vdc	V	5.07	Vdc
R_v	50.5	$K\Omega$	R_v	50.5	$K\Omega$
R_R	99.1	$K\Omega$	R_R	99.1	$K\Omega$
R_{Rm}	55.45	$K\Omega$	R_{Rm}	28.75	$M\Omega$
I	22.5	μA	I	0.16	μA

Se observa que la diferencia entre las resistencias es de 500 veces, por lo tanto se establece que en presencia de aire, la tensión entre las puntas será 5 Vdc mientras que en presencia de agua será de 2 Vdc. La exactitud de las medidas se ve fuertemente influenciada por la calibración de la sonda, la calidad de la fuente de alimentación y de la velocidad de muestreo.

El circuito número 1 presenta la mejor opción dado que es apreciable con mayor facilidad el cambio de conductividad, además en el circuito 2 se encuentran fuertemente relacionadas entre si la señal de las agujas ya que la corriente que pasa a través del circuito depende del estado de la otra y existe un acoplamiento eléctrico indeseable.

3.4.4.2 Cableado y ruido eléctrico

La mayor parte del ruido presente en la señal es debido al estado de la sonda y al error asociado a la fuente de alimentación. La salida de la fuente de alimentación estabilizada se ajusta a de 5 Vdc con una intensidad máxima de salida de 0.02mA, tiene una tolerancia de salida de 2% y un rizado máximo de 7 mV; el rizado de 7mV es en principio pequeño, pero si no se tiene cuidado con la configuración del tamaño de muestra y la velocidad de adquisición pueden existir acoplamientos en la señal provocando un acoplamiento entre el rizado y la señal.

El conductor empleado en toda la instalación se encuentra apantallado, además se ha tenido cuidado en la correcta conexión a tierra de todo el sistema por lo que puede considerarse al tipo de la fuente de la señal como aterrizado. En un principio se había tomado como referencia la conexión a tierra de suministro eléctrico pero el nivel de ruido era mayor, ahora todas las señales y voltajes son referidos a la referencia de las tarjetas de adquisición de datos, de este modo las señales son más limpias y que a su vez esta referida al sistema de tierras de la alimentación eléctrica, esto es de suma importancia ya que en el análisis la pureza de la señal determina en gran parte el nivel de error en el cálculo.

3.5 Instalación y operación

3.5.1 Instalación

Se coloca la sonda verticalmente con las agujas en dirección del flujo. Una vez fija, se conectan las 3 terminales del sensor y se alimenta el circuito correspondiente con 5 Vdc.

La señal obtenida se lee con una tarjeta de adquisición de datos, también puede visualizarse con la ayuda de un osciloscopio. Se recomiendan velocidades de adquisición próximas a 15 000 muestras/segundo.

3.5.1.1 Puerto

La sonda de conductividad, al ser un instrumento intrusivo, debe ser introducido en la sección de medida, para ello se ha diseñado un dispositivo que permite la instalación y posicionamiento de la sonda en el interior de la sección de medida evitando fugas y cualquier alteración geométrica del flujo bifásico. En el diseño de este dispositivo, que llamaremos puerto, se ha considerado el costo y tiempo de fabricación, reducida interferencia en el desarrollo del flujo conservando la sección cilíndrica constante a lo largo de la sección de medida, fácil instalación, operación y mantenimiento.

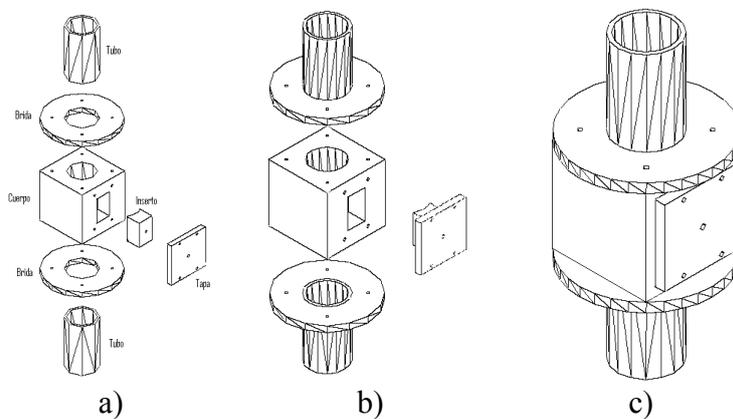


Figura 3.19 Puerto

Se estudiaron varios diseños, y el prototipo seleccionado se muestra en la figura 3.19. La primera figura muestra un despiece de todo el conjunto, en la segunda imagen se observa dos bridas en las partes inferior y superior respectivamente del cuerpo del puerto que sirven para el acoplamiento mecánico del mismo.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

La figura 3.19.c muestra esquemáticamente la instalación del puerto en la sección de medida o tubería acoplado con las bridas y la puerta de acceso al interior del puerto de medida.

Cuerpo

Este dispositivo fue obtenido a través del maquinado de un bloque sólido de metacrilato transparente, es un cubo de 10cm^3 en el que se inserta en la cara frontal puerta de acceso al interior del puerto.

Posee un orificio pasante de 52mm de diámetro de sección constante e igual al diámetro de la tubería de la sección de medida. En las caras superior e inferior se acoplan las bridas mediante 4 tornillos M5, entre las superficies de brida y cuerpo respectivamente se instaló un empaque de goma para lograr un adecuado sellado y evitar fugas.

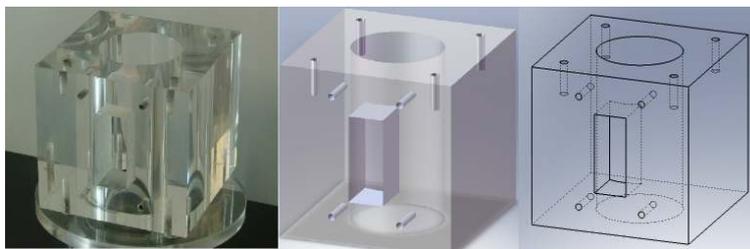


Figura 3.20 Cuerpo

Se realizó en dos puertos un orificio sobre el cual se introdujo un medidor de presión para obtener datos acerca de la caída de presión a lo largo de la columna. Esto sin embargo fue muy amplio por lo que se introdujo un tubo capilar para impedir que las burbujas entrasen en el interior del sensor y así alterara la medida. El tubo capilar tiene 1mm de diámetro interior.

Puerta de acceso al interior del puerto

La pieza denominada puerta de acceso es una pequeña pieza de metacrilato que se adhiere a placa de metacrilato formando una unión permanente. Aunque no se muestra en esta figura, estas 2 piezas tienen un tornillo para asegurar la unión.

Existe un accesorio adicional el que se introduce la sonda, se llama pasamuros y permite la estanqueidad de todo el conjunto, se puede ver en la imagen siguiente. Mediante un sistema de posicionamiento lineal se realiza el movimiento radial de la sonda en el interior de la sección de medida.

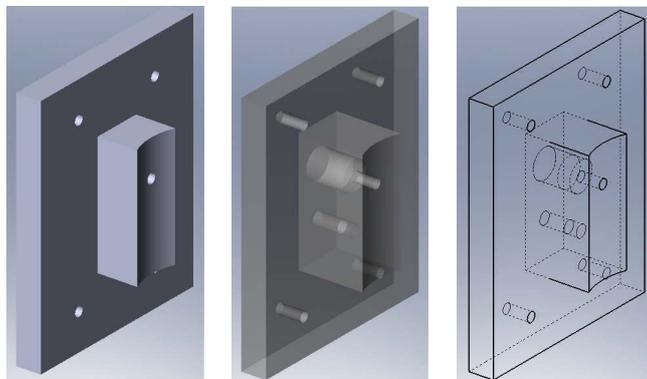


Figura 3.21 Puerta de acceso al interior del puerto

Bridas

Las bridas, maquinadas en placa de metacrilato de 10mm de espesor, se unen mediante adhesivo a los tubos que forman la sección de medida. Debido al alto costo de fabricación, las bridas no poseen medidas normalizadas, ello dificultaría en el futuro el acople de sistemas de medición de caudal o cualquier otro equipo con conexión por bridas, sin embargo por el momento solo se acoplaran los puertos de medida en la sección de ensayos.

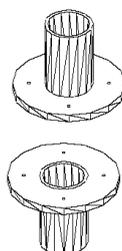


Figura 3.22 Brida

3.5.2 Sistema de Posicionamiento

a) Posicionamiento manual

Una vez introducida la sonda en la sección de media mediante el puerto, es necesario desplazarla Radialmente dentro de la sección de medida. En un principio se desplazaba manualmente la sonda de conductividad y con ayuda de señalizaciones en el puerto y un calibrador vernier se realizaba el recorrido de la sonda.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

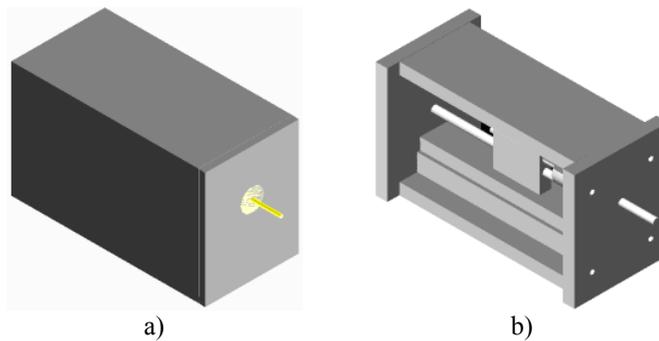
Posteriormente se instaló un mecanismo que permitía realizar recorridos con mucha precisión y repetibilidad pero al ser manual ralentizaba sumamente el proceso de captura de la señal de las sondas en tres locaciones axiales, además en el desplazamiento de las sondas montadas en cada puerto añadían 20 minutos a la duración de un ensayo, llegando a durar 3 horas la toma de una sola condición de flujo de fase líquida (para una velocidad superficial de líquido dada, 5 cambios en la fracción de huecos en función de la velocidad superficial de la fase líquida). Este método es francamente inviable si se desea construir una base de datos medianamente extensa. La figura 3.23 muestra este sistema de posicionamiento mecánico, consiste en una plataforma que soporta a un micrómetro y una plataforma móvil sobre la que se instaló un soporte de sujeción para la sonda de conductividad.



Figura 3.23 Sistema manual de posicionamiento sujeto a la estructura

b) Posicionamiento automático

Las opciones comerciales provocarían modificaciones considerables en la configuración geométrica del puerto, específicamente en el subensamble inserto-tapa, además su costo es superior a 10 veces el costo del presente posicionador automático. El láser posee un sistema de posicionamiento automático.



3.5 Instalación y operación



Figura 3.24 Prototipo y posicionar automático

El autor desarrollo la aplicación basándose en este accesorio desarrollando un prototipo que posee una precisión similar a un costo muy bajo y muy parecido en cuanto al principio de funcionamiento.

Los tres posicionadores automáticos actúan simultáneamente en la dirección radial, cada uno recibe la alimentación de la tarjeta de control, al terminar el ensayo con todas las posiciones preestablecidas el posicionador lleva automáticamente a la sonda a su posición original. Cada posicionador consta de un motor de pasos controlado desde el ordenador de control, el cual ante una longitud proporcionada por el usuario envía un tren de pulsos con una frecuencia preestablecida a una tarjeta de control que al recibir esta consigna alimenta eléctricamente las bobinas del motor de pasos hasta que se alcanza la posición deseada en la dirección adecuada y a la velocidad preestablecida. La presión de este dispositivo es de 0.025mm, no obstante la distancia mínima con la que se opero fue de 0.5mm en posiciones cercanas a la pared.

El diseño original del posicionador automático contiene un medidor de posición, sin embargo dada la falta de tiempo el prototipo en uso carece de este dispositivo cuya finalidad es la de proporcionar información acerca de la posición de la sonda en cualquier momento con la posibilidad de guardar información para un reposicionamiento posterior de la sonda. Al carecer de un instrumento de medición de posición, debe operarse con sumo cuidado este dispositivo ya que fácilmente se puede perder la posición de la sonda si no se respeta la secuencia adecuada de procesos para operar correctamente este dispositivo.

Aunque la construcción de la sonda no lo permite, es posible que el posicionador efectúe un recorrido radial completo a través de la sección de medida, sin embargo sólo se realiza un recorrido equivalente a un radio debido a que se asume una distribución radial simétrica

Capítulo 3. Sonda de conductividad

La presión de este dispositivo es de 0.025mm, no obstante la distancia mínima con la que se empleó este dispositivo fue de 0.5mm en posiciones cercanas a la pared. El diseño original del posicionador automático contiene un medidor de posición, sin embargo dada la falta de tiempo el prototipo empleado carece de este dispositivo cuya finalidad es la de proporcionar información acerca de la posición de la sonda en cualquier momento con la posibilidad de guardar información para un reposicionamiento de la sonda, sin embargo respetando la secuencia adecuada de procesos para operar correctamente es este dispositivo no existe problema alguno.

3.5.3. Adquisición de datos

La señal que se obtiene de la sonda es de carácter analógico entre 2.0 y 5.0 v. Para ello se configura un canal de la tarjeta de adquisición de datos en modo diferencial para cada punta de la sonda.

La configuración se realiza con el programa NI-Max, actualmente es empleada una tarjeta de 16 bits de resolución a una velocidad máxima de muestreo de 200 000 muestras/seg. Un programa desarrollado en LabView controla la instalación experimental en cuanto a adquisición y procesamiento de señales¹. Uno de los módulos que lo componen es el encargado de capturar la señal de la sonda de conductividad y guardarla en archivos de texto. El programa captura 45000 muestras por canal a una velocidad de 15 000 muestras por segundo capturando una muestra de cada canal alternadamente, de este modo entre 1 punto del canal 1 y el siguiente (del canal 2) hay $5\mu\text{s}$ ($1/V_{\text{max}}$). La figura 3.25 muestra la estructura general del módulo de la adquisición de señal de la Sonda.

¹ Este programa de control se describe en el próximo capítulo, en la sección 3.4.

3.5 Instalación y operación

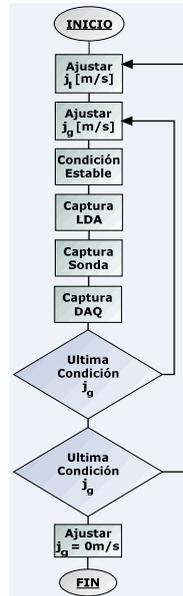


Figura 3.25 Estructura del programa en LabView para la captura de la señal

De manera general consta de una subrutina que carga las posiciones que serán enviadas a los posicionadores automáticos, en cada posición se captura la señal de la sonda y se almacena en un archivo en formato texto que contiene la señal eléctrica de cada punta, la frecuencia de muestreo y el número de muestras adquiridas por cada sensor.



3.26 Diagrama de flujo de control-captura de sonda en Labview

Cuando se ha cubierto la última posición el programa ordena al posicionador regresar a la posición original de la sonda en espera de una nueva condición de flujo a ensayar. La figura 3.26 muestra el diagrama de flujo del módulo desarrollado en la plataforma Labview y que es el encargado del control y captura de la adquisición de señal de la sonda

3.6 Esquema de procesado de la señal

La sonda de cuatro puntas proporciona información acerca del tiempo de residencia de cada fase en los sensores y el lapso de tiempo que toma una burbuja en tocar la punta larga y las demás puntas cortas. Para obtener información útil es requerido el procesado de la señal que se efectúa en cuatro etapas i) acondicionamiento de la señal, ii) categorización o clasificación en grupos, iii) cálculo de cantidades instantáneas de los parámetros de flujo y iv) corrección. Debe señalarse que son añadidos factores de corrección productos de calibración y ajustes teóricos del esquema de procesado.

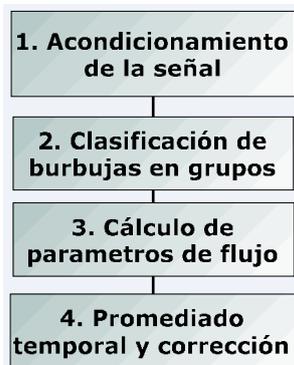


Figura 3.26 Esquema de procesado

3.6.1 Acondicionamiento de la señal

La extracción de la información a partir de la señal registrada comienza con un filtrado de la señal mediante la aplicación de un filtro de mediana móvil que consiste en dividir en grupos de 5 elementos a las 450,000 muestras que representan la señal capturada por cada punta, a ese pequeño grupo se obtiene la mediana y el valor central de dicho grupo es sustituido por el valor de la mediana. El objetivo de este filtrado es eliminar transitorios indeseables y de altas frecuencias debidos a la electrónica de las tarjetas de adquisición de datos. La figura siguiente muestra un ejemplo de la señal antes y después del proceso de filtrado.

3.6 Esquema de procesamiento de la señal

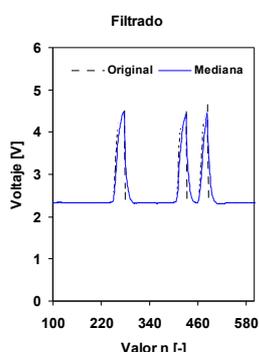


Figura 3.27 Filtrado de la señal

Una vez realizado el filtrado se realiza una normalización con el objetivo de obtener una señal escalón, para ello se obtienen los valores máximo y mínimo de la señal de cada punta y se emplea la siguiente expresión:

$$V_{i,N}^k = \frac{V_i - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \quad (3.64)$$

Donde $V_{i,N}^k$ es el valor i normalizado de la punta k , V_{\min} , V_{\max} y V_i son los valores de tensión mínimo y máximo del valor de tensión eléctrica detectado por la punta k (donde $k = 1, 2, 3$ y 4).

Para obtener el valor mínimo se emplea el siguiente algoritmo: de todo el conjunto de valores de la punta k , se obtienen los valores máximo y mínimo, posteriormente el rango abarcado por estos valores, ecuación 3.64, es dividido en cuatro partes y se crean cuatro subconjuntos cuyos límites superiores se definen con la expresión 3.65.

Los valores de la señal que se encuentren dentro de cada límite son contabilizados. Se obtiene una función de densidad de probabilidad y de aquel conjunto que contenga mayor número de valores se obtiene un valor promedio que es establecido como el valor mínimo y es empleado en la expresión 3.64.

$$R = V_{\max} - V_{\min} \quad (3.65)$$

$$L_i = V_{\min} + 0.25 * i * R \quad (3.66)$$

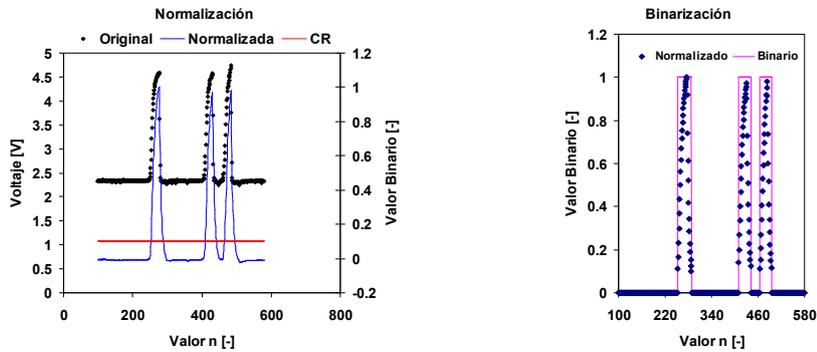


Figura 3.28 Normalización y binarización

A continuación se realiza una transformación binaria que comienza con determinar los puntos cuyo valor sean menores a un valor umbral cr_k , mismos que serán asignados con un valor igual a 0. La función de este umbral es eliminar variaciones de voltaje pequeñas cuando la punta detecta solamente líquido. Después de algunas pruebas se determinó un valor cr_k igual a 10%, la señal que obtenemos es de muy buena calidad y la presencia de ruido eléctrico es baja, en parte debido a la buena calidad de la fuente de alimentación. Un criterio empleado para determinar el inicio de una interfase o de burbuja es contabilizar el número de puntos que sobresalen del nivel umbral y observar su comportamiento, si los cinco siguientes valores a un punto i con valor 0 presentan incrementos con tendencia de positiva se considera el inicio de una burbuja y se igualan a 1, de otro modo se considera que es ruido eléctrico y es eliminado. Por otra parte, la interfase posterior se define cuando los cinco valores siguientes a un punto j (distinto de 0) presentan una tendencia negativa menor a un porcentaje (cr_{high}). El porcentaje cr_{high} es obtenido en función del valor máximo dentro del intervalo de la burbuja i y de la burbuja $i+1$ considerando el 100% de los puntos existentes. La figura 3.28 muestra esquemáticamente los procesos descritos.

3.6.2 Categorización

Una vez identificado el inicio y final de cada burbuja en la señal de cada sensor y su posterior binarización se procede a la identificación de las burbujas en las señales escalón de las cuatro puntas.

3.6 Esquema de procesamiento de la señal

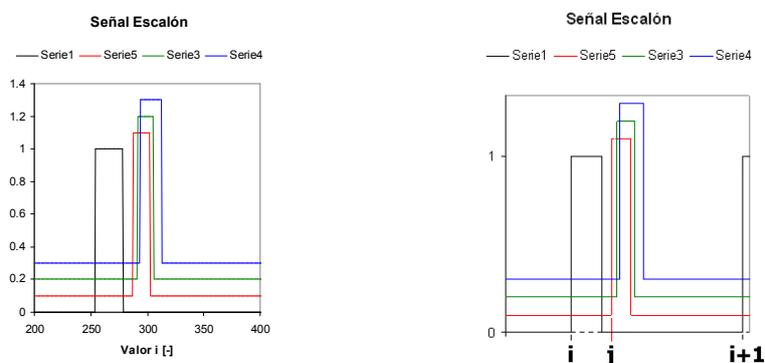


Figura 3.29 Señal binarizada

La figura 3.29 muestra un ejemplo de una señal binaria de 4 puntas. En el proceso de identificación de burbujas se observa la punta larga como referencia principal, de manera que en la señal se identifica el inicio de una burbuja i y el inicio de la burbuja $i+1$, es decir las posiciones o valores P_i y P_{i+1} respectivamente. Posteriormente, en la señal de la punta corta 1 se busca el inicio de una burbuja j tal que cumpla $P_i < P_j > P_{i+1}$. Se contabiliza el número de burbujas efectivas y se obtiene una velocidad instantánea para cada una dividiendo la distancia entre puntas larga y corta 1 entre el tiempo ocurrido en ΔP_i . Si no se cumple la desigualdad se procede a aplicar el algoritmo a la burbuja $i+1$ en la punta larga. Este proceso se realiza para toda la señal.

Para asegurar que las señales de la punta larga y corta 1 corresponden con a la misma burbuja, se establece como criterios de validación el que la velocidad instantánea se encuentre dentro de un rango definido por una velocidad media y un factor de relajación f . Para ello se obtiene una función densidad de probabilidad de la velocidad instantánea medida, estableciendo un rango cuyo valor central N_{MP} represente el valor medio de la densidad de probabilidad de la velocidad instantánea V_{MP} y cuyos límites inferior y superior sean $-0.5N_{MP}$ y $0.5N_{MP}$, se obtiene la velocidad promedio sumando las velocidades instantáneas que se encuentren dentro de dicho rango dividida por el número de muestras presentes, figura 3.30. Se consideraran válidas aquellas burbujas que cumplan con este criterio.

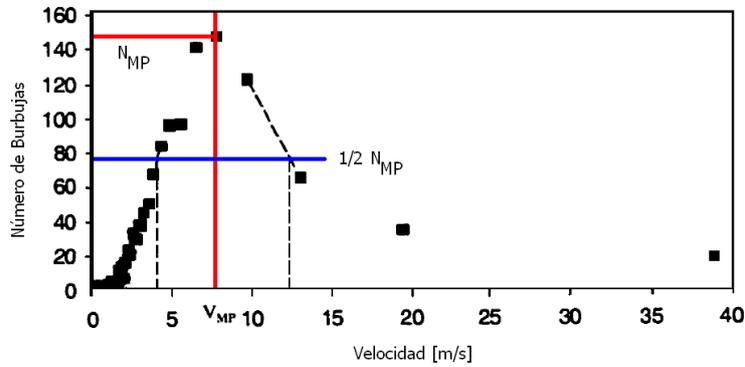


Figura 3.30 Estimación de la velocidad media a partir de una PDF

Este criterio es válido en regímenes de flujo bubbly ya que las burbujas poseen características muy semejantes en cuanto a forma y movimiento. En régimen de flujo slug el proceso de identificación es más complicado, en este caso sólo es analizada la posición radial de la sonda en el centro de la sección de medida para obtener el valor promedio de la velocidad de burbujas slug. Debido a que en este régimen de flujo existen además de las burbujas caps y slug burbujas pequeñas de formas esféricas, a las cuales es aplicado el criterio antes descrito.

La punta larga y corta 1 son empleadas para determinar los parámetros locales de flujo bifásico para burbujas esféricas y distorsionadas. Para burbujas Slug y caps es necesario analizar en conjunto las señales de los cuatro sensores. La clasificación de la señal en burbujas efectivas y burbujas miss o *perdidas* es fundamental para la determinación de los parámetros locales instantáneos tanto para burbujas del grupo 1 o esféricas/distorsionadas y burbujas del grupo 2 o cap/slug.

La categorización se realiza analizando la señal del sensor 0 o punta larga y con base a la medida de la longitud de cuerda. Esta longitud de cuerda determina la forma de la burbuja y la clasifica en 3 posibles grupos que son esféricas, distorsionadas y caps/slug. Las siguientes expresiones marcan los límites de cada categoría:

$$D_{esf} = 4 \sqrt{\frac{2\sigma}{g\Delta\rho}} N_{\mu_f}^{1/3} \quad (3.67)$$

$$N_{\mu_f} = \frac{\mu_f}{\left(\rho_f \sigma \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}}\right)^{1/2}} \quad (3.68)$$

$$D_{dist} = 4 \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}} \quad (3.69)$$

$$D_{cap_{MAX}} = 40 \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}} \quad (3.70)$$

$$D_b = D_{Sección} \quad (3.71)$$

Donde la ecuación 3.3.67 representa el límite máximo para burbujas esféricas, la expresión 3.69 el límite máximo para burbujas distorsionadas, y la expresión 3.70 para burbujas caps. Las burbujas Slug son definidas con la ecuación 3.71. Para burbujas esféricas y distorsionadas la longitud máxima de cuerda es 2mm y 10mm aproximadamente. Para burbujas Taylor el diámetro es superior a 10mm.

3.6.3 Parámetros de flujo instantáneos

Es crucial determinar cuando una burbuja genera señal efectiva y cuando no, ello con la finalidad de obtener valores locales instantáneos y temporales correctos. Una señal efectiva es aquella generada por una burbuja que toca las cuatro puntas en el orden adecuado, esto es particularmente necesario para burbujas Taylor ya que para determinar los parámetros de burbujas esféricas solo es necesaria la señal obtenida por las puntas 0 y 1.

Hay que indicar que es imprescindible contabilizar todas y cada una de las burbujas en el periodo de muestreo o incluir el factor de missing bubbles para poder obtener un valor fiable de la fracción de huecos. En cambio en la determinación de la velocidad de la interfase este factor puede ser mucho más relajado ya que podemos obtener un valor promediado de la velocidad atendiendo a las burbujas cuya señal es claramente detectada, ya que es de suponer que las velocidades variarían poco, y el dato útil, aún disponiendo de valores individualizados por burbujas seguiría siendo un valor promediado.

Concentración de área interfacial

El cálculo de la concentración de área interfacial se efectúa en dos pasos, el primero de ellos consisten en obtener la concentración de área interfacial local e instantánea mediante la información aportada por las burbujas con señales efectivas. El segundo paso es obtener el promedio temporal a partir de la distribución del número de burbujas y la contribución promedio de cada burbuja a partir de las cantidades instantáneas.

Se asume en este punto que la burbuja promedio que genera una señal efectiva tiene las mismas propiedades que aquellas no poseen señales efectivas pero que han sido detectadas por la punta larga, es aquí cuando se integra la información de las burbujas no-efectivas o *missing bubbles*.

Otros parámetros

La fracción de huecos es determinada solamente por la señal obtenida por el la punta larga. La velocidad es estimada a partir de las señales de los sensores 0 y 1 obteniendo una velocidad promedio de la interfase de la burbuja. El diámetro Sauter es dependiente de la concentración de área interfacial y de la fracción de huecos (ecuación 3.51). El numero de burbujas y su distribución es obtenida a partir de la información de la señal de la punta larga.

3.7 Comprobación de resultados

Esta sección tratara de los criterios que se emplean para validar las mediciones realizadas con la sonda con el fin de asegurar que las medidas obtenidas con este instrumento son confiables. Esta comprobación se efectúa en todas las mediciones realizadas e involucran la comparación de información obtenida con la sonda de conductividad por un lado y por otro la obtenida con el empleo de otros dispositivos de medición. Se ha observado que dos errores comunes: un incorrecto posicionamiento de la sonda particularmente importante cuando las velocidades de la fase liquida son menores a 2m/s y una fabricación defectuosa de la sonda cuyas consecuencias solo son apreciables tras el procesado de la señal.

3.7.1 Comprobaciones durante la fabricación

El proceso de aislamiento superficial, de la aguja de acupuntura, representa uno de las mayores fuentes de error en la fabricación de la sonda, ya que si las velocidades de inmersión son altas se producen gotas de recubrimiento en la superficie, por ello se recomienda velocidades de 40mm/minuto aproximadamente. La segunda fuente de error mas importante es el proceso de aislamiento de la unión soldada de la aguja de acupuntura y el conductor de cobre, ya que al ser generalmente grandes (aproximadamente 1mm de espesor) , al introducirse en el tubo capilar de acero inoxidable, puede dañarse por la fricción entre la pared y la superficie de la unión, produciendose desprendimientos del aislamiento, por ello la introducción de las agujas de acupuntura en el interior del tubo capilar debe ser sumamente lenta y cuidadosa.

3.7 Comprobación de resultados

Por último el proceso de instalación en el posicionador y posteriormente en el puerto de medida debe realizarse con mucho cuidado pues un error en esta etapa es irreparable y obliga a sustituir la sonda.

3.7.2 Comprobaciones visuales de los resultados

Además de las respectivas comprobaciones de la sonda de conductividad durante su fabricación, una primera comprobación se orienta a conocer el estado físico de la sonda una vez instalado en la sección de medida ya sea cuando la sonda es nueva (detección de deformación de las puntas, por ejemplo) o cuando ya ha sido usada con anterioridad (con el tiempo los materiales se degradan ante la presencia de una excesiva humedad y contacto con el agua). Esto se logra visualizando y evaluando cualitativamente la calidad de las distintas curvas producto del procesado de la señal, mismas que no deben mostrar picos o valles pronunciados entre una posición radial local la adyacente, es decir, el comportamiento de la señal debe ser relativamente suave. La figura 3.31 muestra el efecto de la degradación del sensor, se observa una señal oscilante, en este caso la velocidad de líquido era 1.0m/s con una fracción de huecos de 5% aproximadamente. En estos casos no existe solución a este error y debe sustituirse la sonda por una nueva.

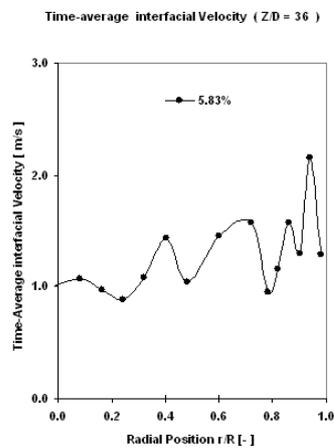


Figura 3.31 Señal de una sonda en mal estado físico

Capítulo 3. Sonda de conductividad

Otra inspección visual consiste en observar características puntuales en las gráficas resultantes del procesado de las señales de la sonda. La primera de ellas es la verificación del pico de pared o *Peak Wall* a una velocidad de líquido menor a 2m/s y una fracción de huecos determinada, por ejemplo 15%. La forma de éste pico de pared es indicador de un correcto posicionamiento del sensor de conductividad ya que si se encuentra demasiado “retirado” de la pared no mostrara un valor máximo característico, en cambio si no se tiene cuidado en la posición final del sensor este podría “pasarse” y doblarse provocando su inutilización, además mostraría la grafica de fracción de huecos un error en la forma del pico cerca de la pared.

La metodología del posicionamiento define la forma del pico máximo ya que una diferencia de 0.25mm entre una posición y otra marca mucha diferencia. En las figura 3.32 se muestra el comportamiento de la fracción de huecos detectada por la sonda cuando ésta se posiciona de manera correcta (4.66%) e incorrecta (2.98%, 3.84%). La diferencia entre las señales es de 0.25mm en el posicionamiento de la sonda, ello demuestra que un incorrecto posicionamiento generará errores.

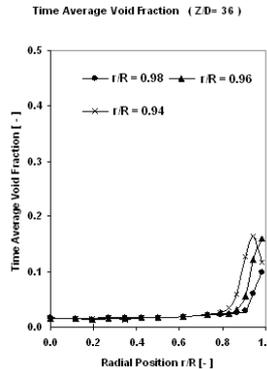


Figura 3.32 Efectos sobre la fracción de huecos en diferentes posiciones

Dependiendo del diseño de la sonda, ésta puede ocasionar fallos en la detección de la fracción de huecos cercana a la pared presentando un comportamiento ascendente ilimitado. Esto es debido a que la sonda detecta burbujas falsas debidas a la interacción entre la punta larga de la sonda y la pared de la sección de medida.

3.7 Comprobación de resultados

Este problema se resuelve modificando el procesado eliminando aquella información que se encuentra en las posiciones en las cuales la separación entre la punta larga de la sonda y la pared sea menor al diámetro medio de las burbujas².

Este problema se observa cuando la curva de fracción de huecos no muestra un pico máximo aún cuando la sonda esta colocada en la máxima cercanía a la pared. La forma de la curva de velocidad superficial en los puntos cercanos a la pared proporciona información en cuanto a errores, por ejemplo una forma correcta indicará una menor velocidad en las posiciones cercanas a la pared y una mayor velocidad en el centro de la sección de medida.

Se presentan errores en esta curva cuando la sonda no está bien posicionada debido a que si esta muy lejos de la pared no se observará una caída de la velocidad en los puntos cercanos a la pared, por otro lado presentara un valle si la sonda se ha “pasado” en su posicionamiento. En algunos casos, dependiendo el diseño de la sonda, la señal presenta un incremento ilimitado de la velocidad en la pared lo cual es físicamente imposible, este error indica un fallo numérico en el procesado. Este error se corrige eliminando esas falsas señales detectadas por la sonda. La figura 3.33 muestra algunos ejemplos de la curva de velocidad superficial y sus errores más comunes así como una correcta posición.

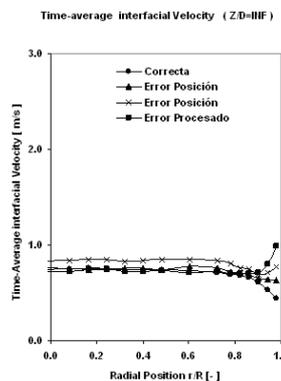


Figura 3.33 Curva de velocidad

En la instalación de la sonda pueden ocurrir errores al efectuar el cableado de la misma.

² En el capítulo de análisis se muestra y justifica este procedimiento.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

En la gráfica 3.34 se muestra el efecto de errar la conexión eléctrica entre puntas, en este caso las condiciones eran de 1m/s de la fase líquida y 10% de fracción de huecos. Las señales correspondientes a la serie *Correcta* muestran la curva obtenida cuando la conexión eléctrica es la correcta. Cuando se intercambian eléctricamente las puntas Corta 2 y Corta 3 de la sonda se obtiene la curva *Error 2*, las curvas mostradas muestran los mismos valores, sin embargo la curva de CAI (no mostrada) presenta errores en la pared: los valores son excesivamente grandes en la pared.

Las curvas *Error 2* y *Error 3* ocurren cuando las puntas Corta 2 y Corta 3 se conectan en lugar de la punta larga. Se observa que la fracción de huecos es igual en todos los casos pero no así la curva de la velocidad, la cual en la pared muestra valores erróneos ya que no es posible que en la pared la burbuja tenga una velocidad mayor que en el centro de la sección de medida.

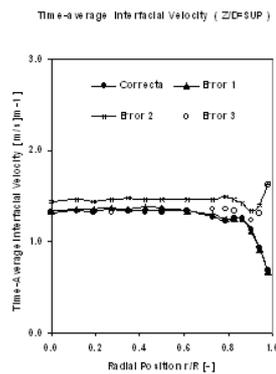


Figura 3.34 Errores en la conexión de la sonda

Otras inspecciones visuales se centran en el número de burbujas detectadas por el sensor que es diferente en las posiciones del centro y en la pared, al igual que en las posiciones axiales inferior ($Z/D = 2$) y medio ($Z/D = 36$), sin embargo esas diferencias no deben ser excesivamente grandes.

Existe un tercer aspecto que debe ser cuidado. Dependiendo el diseño de la sonda, ésta puede presentar fallos en la detección de la fracción de huecos cercana a la pared presentando un comportamiento ascendente ilimitado, ello es debido a que la sonda detecta burbujas falsas debidas a la interacción entre la punta larga de la sonda y la pared de la sección de medida.

3.7 Comprobación de resultados

Este problema se resuelve modificando el procesado eliminando aquella información que se encuentra en las posiciones en las cuales la separación entre la punta larga de la sonda y la pared sea menor al diámetro medio de las burbujas³. Una vez que la primera inspección visual es acertada, la inspección visual se concentra en la forma de la curva de velocidad superficial en los puntos cercanos a la pared, la forma correcta indicara una menor velocidad en las posiciones cercanas a la pared y una mayor velocidad en el centro de la sección de medida.

En un principio se presentan errores en la señal cuando la sonda no está bien posicionada debido a que si esta muy lejos de la pared no se visualizara una caída de la velocidad en los puntos cercanos a la pared, por otro lado presentara un valle si la sonda se ha “pasado” en su posicionamiento.

En algunos casos, dependiendo el diseño de la sonda, la señal presenta un incremento ilimitado de la velocidad en la pared lo cual es físicamente imposible, este error indica un fallo numérico en el procesado.

Otras inspecciones visuales se centran en el número de burbujas detectadas por el sensor que es diferente en las posiciones del centro y en la pared, al igual que en las posiciones inferior ($Z/D = 3$) y medio ($Z/D = 36$), sin embargo esas diferencias no deben ser excesivamente grandes.

3.7.3 Comprobaciones con otros instrumentos de medida

a) Comprobación de la Fracción de huecos

La presión medida en la base de la columna indica de manera indirecta la cantidad de agua que esta presente en la columna, si en dicha columna se introduce una mezcla bifásica la medida de la reducción de la presión respecto a la anterior sin gas indica también la cantidad de gas que esta presente en la columna.

$$p(h) = \int \rho g dh \quad (3.72)$$

Cuando esta presente una mezcla bifásica en la columna, la presión medida en cualquier punto de la columna evidenciara una variación respecto a la medida de la presión en ese punto cuando es solamente un fluido monofásico (agua), ello es debido al efecto de la cantidad de aire (fracción de huecos) de menor densidad en la columna.

³ En el capítulo de análisis se muestra y justifica este procedimiento.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

Por lo tanto un cambio en la presión medida en un punto puede indicar de manera indirecta la fracción de huecos presente en la mezcla bifásica. Partiendo de la definición de densidad de mezcla bifásica, ésta es función de la fracción de huecos, de la densidad de líquido y de gas. Así lo muestra la expresión 3.73.

$$\rho_m = \frac{\int \rho dV}{V_l + V_g} = \frac{\int \rho_l dV + \int \rho_g dV}{V_l + V_g} = \rho_l(1 - \alpha) + \rho_g \alpha \quad (3.73)$$

Despejando la densidad de líquido de la expresión anterior, y sustituyéndola en la definición de presión de columna de agua se obtiene la expresión (3.74).

Al despejar la fracción de huecos y considerando que la columna se encuentra a la presión atmosférica es eliminado el término de la presión de aire. De este modo es posible obtener una medida experimental de la fracción de huecos en función de las medidas de presión de los medidores instalados en la columna mediante la expresión (3.76).

$$\rho_l = \left(\frac{\rho_m - \rho_g \alpha}{1 - \alpha} \right) \quad (3.74)$$

$$p_l = \rho_l(gh) = \left(\frac{\rho_m - \rho_g \alpha}{1 - \alpha} \right) gh = \frac{p_m - p_g \alpha}{1 - \alpha} \quad (3.75)$$

$$\alpha = 1 - \frac{p_m - p_g \alpha}{p_l} = 1 - \frac{p_m}{p_l} \quad (3.76)$$

En todas las mediciones realizadas se compara la fracción de huecos obtenida a partir de los medidores de presión con la fracción de huecos detectada por la sonda.

Se ha establecido que un error menor del 10% puede estar dentro de lo aceptable en esta comparación, así como se observa en la figura 3.35 en la cual los primeros cuatro puntos muy cercanos a la línea teórica ajustan muy bien, en este caso el flujo era finamente disperso. No obstante los últimos dos puntos varían casi un 10%, que aun es aceptable; en este caso el flujo estaba en transición bubbly – slug.

3.7 Comprobación de resultados

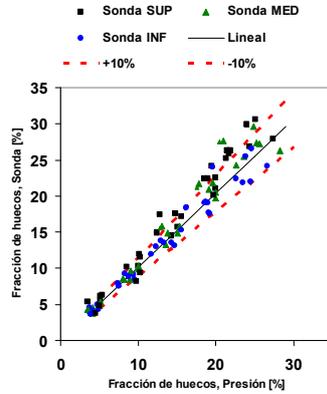


Figura 3.35 Comprobación de la Fracción de huecos con la medida de presión

Cuando nos movemos en fracciones de gas altas, con slug, la caída de presión deja de ser lineal y por tanto, este tipo de comparaciones deja de ser posible de forma directa.

b) Comprobación de Caudal de Aire

La cantidad de aire inyectado en el sistema puede obtenerse a partir de la medida del caudalímetro y a partir de la medida de velocidad interfacial y fracción de huecos empleando la sonda de conductividad.

De la ley del gas ideal y suponiendo que el aire se comporta como tal a las presiones y temperaturas de ensayo (presión atmosférica y 18C) podemos decir que el volumen inyectado en la base de la columna (V_{PCB}) es función de la relación de presiones absolutas en la base de la columna (P_{CB}) y a la salida del medidor de caudal de aire (P_{CAiB}).

$$PV = CTE = P_{CAiB}V_{CAiB} = P_{PCB}V_{PCB} \quad (3.77)$$

$$V_{PCB} = \left(\frac{P_{CAiB}}{P_{PCB}} \right) V_{CAiB} \quad (3.78)$$

$$\int_t V_{PCB} dt = Q_{PCB} = \int_t \left(\frac{P_{CAiB}}{P_{PCB}} \right) V_{CAiB} dt \quad (3.79)$$

Capítulo 3. Sonda de conductividad

$$Q_{PCB} = \left(\frac{P_{CAiB}}{P_{PCB}} \right) Q_{CAiB} \quad (3.80)$$

La expresión (3.79) es válida para un lapso de tiempo t , integrando dicha ecuación obtenemos el caudal volumétrico que entra en la base de la columna. Por otro lado la sonda de conductividad mide la velocidad superficial de burbuja en un conjunto de posiciones a lo largo de una dirección radial, a cada posición esta asociada una medida de fracción de huecos, ahora bien, si la multiplicamos dicha fracción e huecos por la velocidad interfacial promedio en cada posición y por el área de la sección de corona al integrar el resultado a lo largo de la longitud radial obtenemos la expresión (3.81) y que nos proporciona una medida del gasto volumétrico de aire en la columna, donde x es la posición en la que se efectuó la medida, Q_g es el gasto volumétrico de aire y u_i la velocidad interfacial medida con la sonda en la posición x .

$$\int_R u_{i_x} (1 - \alpha_x) A_x dx = Q_g \quad (3.81)$$

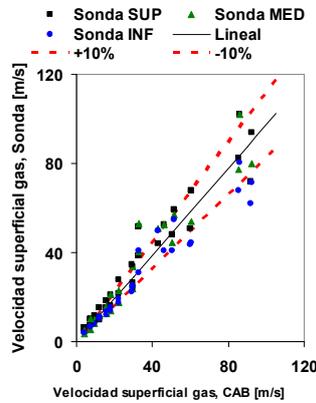


Figura 3.36 Comprobación de caudal de aire

La figura 3.36 muestra un ejemplo de la comprobación de los caudales de aire medidos con el caudalímetro de gas y la sonda de conductividad. En este caso la velocidad de líquido fue 0.5m/s y la fracción de hueco varía de 5% hasta 20%, el régimen fue bubbly. En el régimen slug es de aplicable lo comentado con anterioridad. Además, es necesario indicar la dificultad añadida de considerar las velocidades en este régimen en el que coexisten muchos tamaños de burbuja diferentes.

3.7 Comprobación de resultados

c) Comprobación de caudal de agua

Se realiza comparando la velocidad de líquido del sistema LDA con la medida del caudalímetro electromagnético.

Se realiza comparando la velocidad superficial del líquido, j_l , empleando la medida del sistema LDA y la sonda de conductividad con la medida obtenida con el caudalímetro electromagnético. Esta comparación se obtiene con base en las expresiones (3.82) y (3.83) respectivamente.

La velocidad superficial de líquido se obtiene con la medida de la fracción de huecos α y la velocidad de fase u_l en cada posición x , posteriormente se integra la expresión (3.84) en el rango de posiciones R para obtener el total. La medida de velocidad superficial se obtiene directamente del medidor de caudal electromagnético.

$$j_{lx} = u_{lx}(1 - \alpha_x) \quad (3.82)$$

$$j_l = \frac{Q_l}{A} \quad (3.83)$$

$$\int_R j_{lx} dx = \int_R u_{lx}(1 - \alpha_x) dx \quad (3.84)$$

La tabla 3.6 es un ejemplo de las medidas efectuadas a 0.5m/s y con distintas fracciones de hueco que van de 5 a 25%. En este caso las medidas con el LDA y la sonda ajustan muy bien a las medidas efectuadas con el medidor electromagnético.

3.6 Tabla de comprobación para la velocidad de líquido

Condición	ul (1-VF)	Qcem/A	Resultado	Error
5%	0.498	0.513	Correcto	-2.946
10%	0.482	0.516	Correcto	-6.677
15%	0.481	0.519	Correcto	-7.337
20%	0.483	0.521	Correcto	-7.141
23%	0.487	0.523	Correcto	-6.941
25%	0.535	0.525	Correcto	2.023

3.7.4 Comparación de resultados

Como fue descrito en el capítulo anterior, en la sección 1.3, existen algunos trabajos que buscan la generación de base de datos experimentales que permitan validar modelos teóricos.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

Uno de estos trabajos ha sido muy utilizado en la comparación de modelos y simulaciones. Para efectos de validar nuestras mediciones y dado que la mencionada base de datos contiene información fiable mostraremos a continuación algunas comparaciones entre algunos resultados obtenidos en nuestra instalación. Debe señalarse que esos experimentos de referencia fueron realizados en una instalación similar y las condiciones de flujo iniciales que fueron empleadas son muy semejantes a las empleadas en este trabajo. Los resultados preliminares ajustan satisfactoriamente con los datos experimentales obtenidos por el Dr. Hibiki y colaboradores [Hibiki2001].

Sin embargo las diferencias entre los resultados deben su origen a un cúmulo de factores, uno de ellos son las propiedades de la fase líquida. En la ciudad de Valencia el agua posee una gran dureza y aunque se ha sometido a un proceso de descalcificación difícilmente las propiedades de agua empleadas en la Universidad de Purdue en EE. EU. y en España no son iguales, lo anterior tiene su importancia debido a que se ha reportado que pequeñas diferencias de sal y minerales en el agua afectan la tensión superficial y con ello la estructura de fase en el flujo bifásico.

Por otra parte el método de generación de burbujas emplea un medio poroso, la diferencia y que resulta muy importante es la porosidad media ya que en Purdue es de 40 micrómetros y la empleada en este trabajo es de 20 micrómetros, diferencia que provoca tamaños iniciales de burbujas ligeramente distintos.

La figura 3.37 muestra una comparación entre los Diámetros Sauter medio medidos obtenidos por el Dr. Hibiki en Purdue y los obtenidos en esta Universidad para tres condiciones de velocidad superficial de la fase líquida medidas en la parte mas baja de la columna en $z/d = 6$ y $Z/D = 2$ en E. U y España respectivamente. En las figuras las líneas continuas son las medidas efectuadas en E. U. y los puntos las medidas realizadas en este trabajo. La diferencia entre los valores Diámetro Sauter medio medidos en la condición $j_f = 0.5, 1.0$ y 2.0m/s son respectivamente de 17%, 10% y 11% para fracciones de huecos de 5 a 20%. Estas diferencias son promedios, se observa en la figura 3.37.b que mientras el Dr. Hibiki reporta flujo bubbly nuestros perfiles son característicos de flujo en transición bubbly-slug para una fracción de huecos de 20%.

3.7 Comprobación de resultados

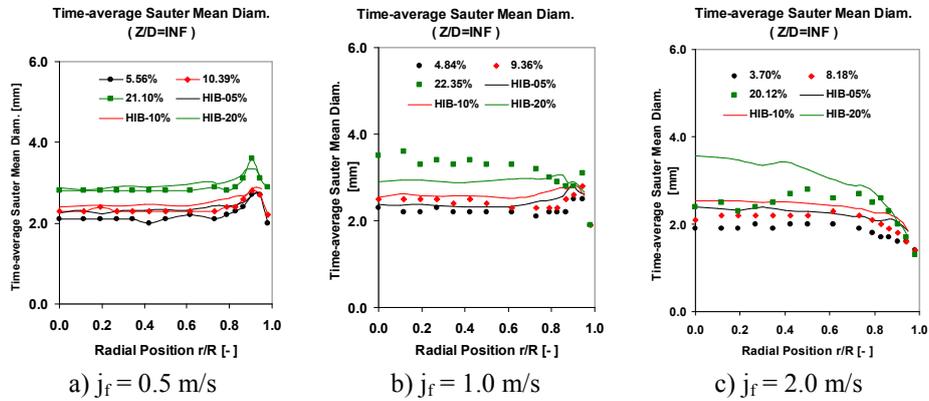


Figura 3.37 Diámetro Sauter medio

Las diferencias entre velocidades de flujo iniciales, mostradas en la tabla 3.7, son pequeñas.

3.7 Condiciones de flujo iniciales

Lugar de medida		5%	10%	20%	25%	
		j_f [m/s]	j_g [m/s]	j_g [m/s]	j_g [m/s]	j_g [m/s]
F01	Purdue	0.491	0.0275	0.0556	0.0129	0.1900
	Valencia	0.513	0.0348	0.0767	0.1742	0.4059
F02	Purdue	0.986	0.0473	0.1130	0.2420	0.3210
	Valencia	1.038	0.0595	0.1414	0.3612	0.6756
F03	Purdue	2.010	0.1030	0.2260	0.4710	0.6240
	Valencia	2.042	0.0975	0.2282	0.4739	0.7268

En cuanto a la infraestructura, la sección de medida en ambos casos es similar aunque la diferencia en el diámetro es pequeña (1.2mm) llegando a ser equivalente a un radio de burbuja en ciertas condiciones. La diferencia entre las secciones de áreas es del 5%.

Se observa que los perfiles de la concentración de área interfacial, velocidad superficial y fracción de huecos son muy similares. En la figura 3.38.c la línea punteada finamente corresponde al perfil de velocidad en flujo monofásico medida en Purdue mientras que la línea punteada con círculos representa la velocidad monofásica en nuestra instalación.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

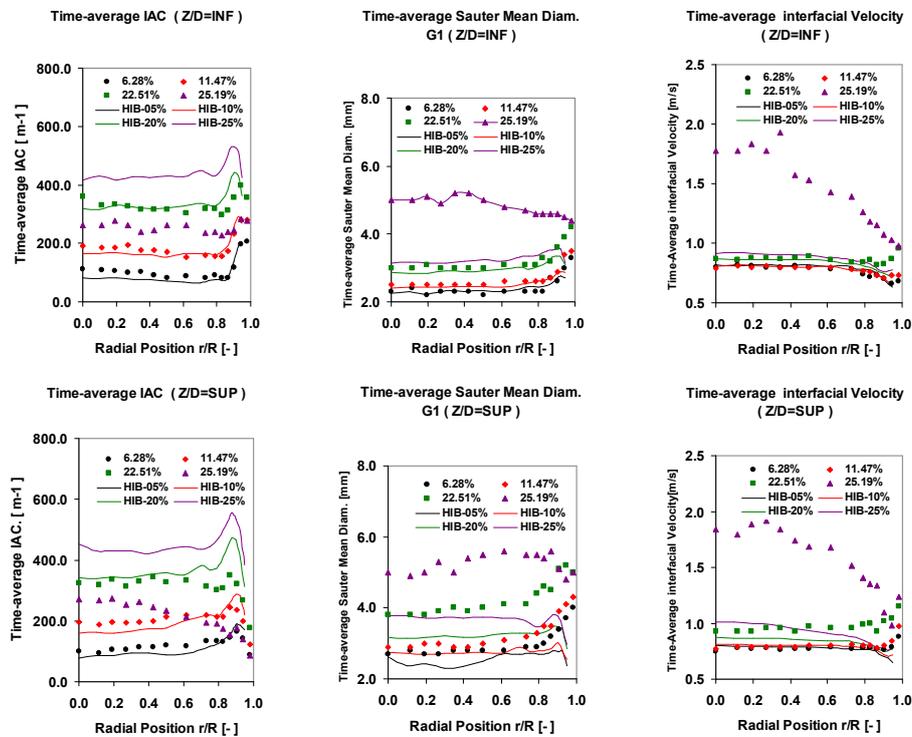


Figura 3.38 Comparación PUMA – Hibiki2001: F0XA, $j_f = 0.5\text{m/s}$

Aunque a efectos de comparación se mencionan fracciones de huecos obtenidas por la referencia de 5, 10 y 20%, existen diferencias significativas en algunos casos. La tabla 3.8 muestra los valores de fracciones de huecos en estas condiciones de ensayo.

3.8 Fracciones de huecos promedio $j_f = 0.5\text{m/s}$

F0X	F0XA	HiB
5.56%	6.28%	5.13%
10.39%	11.47%	9.76%
21.10%	22.51%	20.84%
25.87%	25.19%	28.38%

En el estudio que se emplea como referencia se emplearon sondas de 2 puntas mientras que en nuestro estudio se emplearon sondas de 4 puntas. En parámetros como fracción de huecos y velocidad superficial esta diferencia no debe generar conflictos, sin embargo en la determinación de la concentración de área interfacial y diámetro Sauter pueden existir diferencias significativas.

3.7 Comprobación de resultados

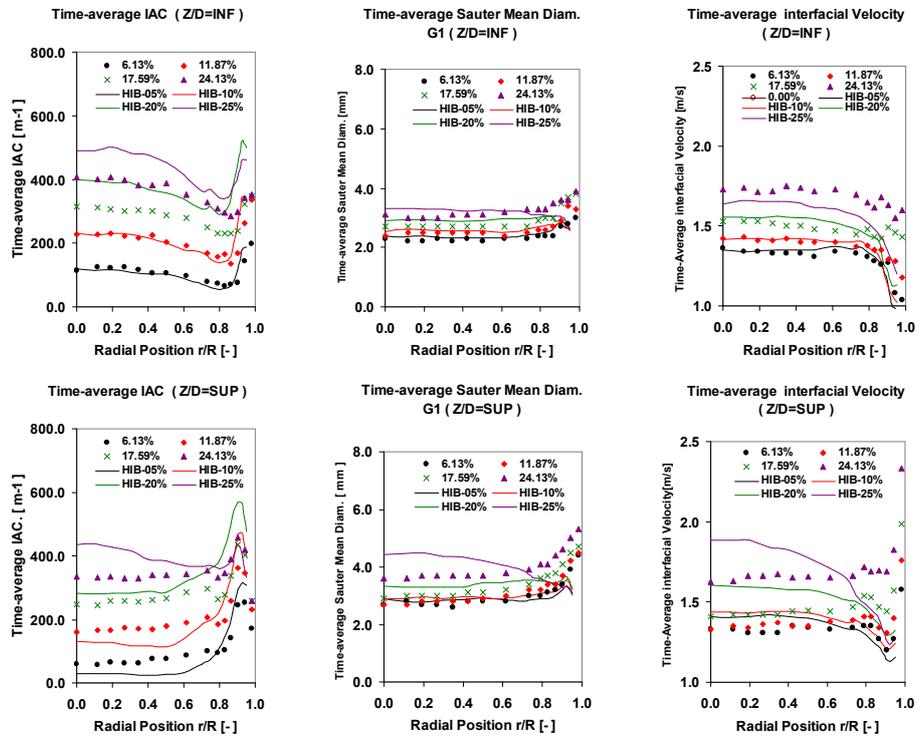


Figura 3.39 Comparación PUMA – Hibiki2001: F0XA, $j_f = 1.0\text{m/s}$

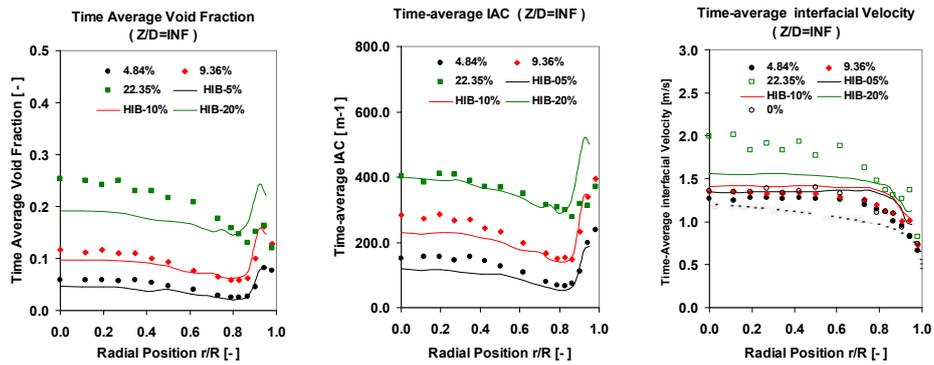


Figura 3.40 Comparación PUMA – Hibiki2001: F0X, $j_f = 1.0\text{m/s}$

Capítulo 3. Sonda de conductividad

Se observa de manera general en las figuras anteriores que los perfiles radiales de los parámetros de flujo son muy similares y que la sonda desarrollada en este trabajo identifica patrones de comportamiento del flujo bifásico, por ejemplo se observa un en la figura 3.40 un pico de pared para los valores de la serie 4.84%, un pico en transición para la serie 22.3% en la misma figura, se observan perfiles planos en la figura 3.40 en las series 4.84% y 9.36% respectivamente. Estos datos nos indican que la sonda de conductividad posee la capacidad de detectar los aspectos más importantes del flujo bifásico, así como valores similares de los parámetros más importantes, con magnitudes muy parecidas a las de otros autores.

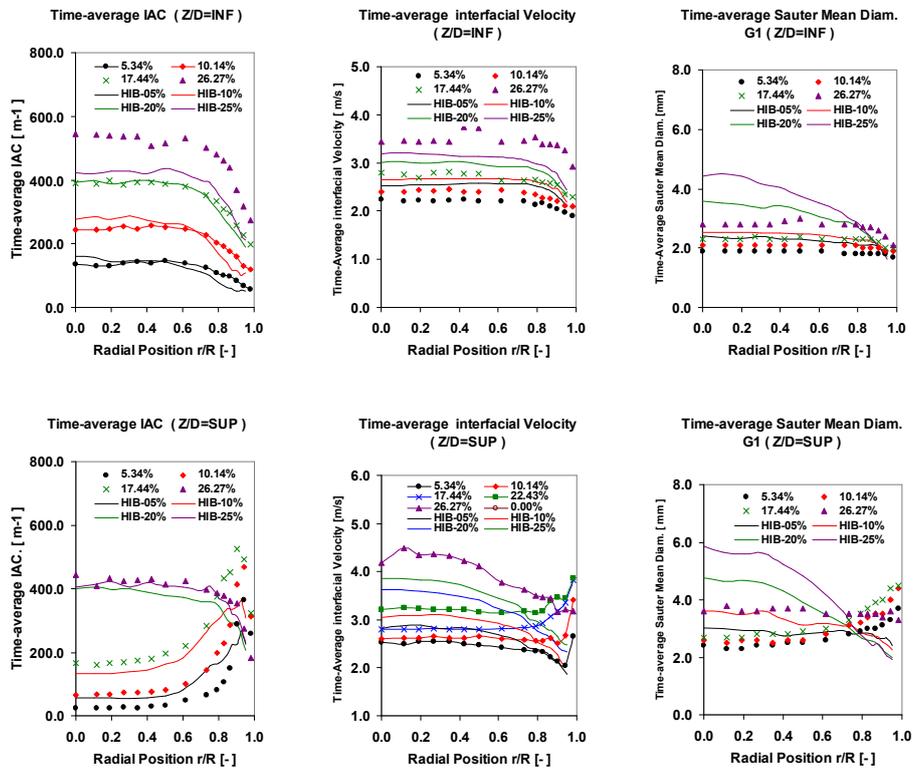


Figura 3.41 Comparación PUMA – Hibiki2001: F0XA, $j_f = 2.0\text{m/s}$

3.8 Degradación de la sonda

Realizadas las pruebas preliminares se ha observado que la resistencia a la corrosión es el punto más crítico ya que tanto la película aislante como el metal de la aguja se deterioran con el tiempo conforme tienen contacto con el agua, ello es principalmente a que el sensor se alimenta con corriente directa y sufre un ataque de corrosión electroquímica. La degradación empieza con la separación paulatina del recubrimiento y aguja.

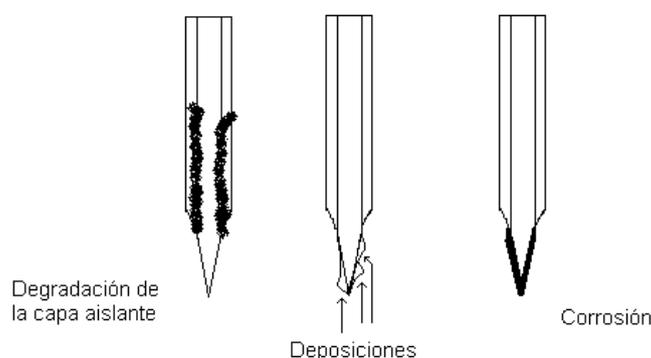


Figura 3.42 Degradación de la sonda de conductividad

El efecto de la degradación del sensor es percibido como una baja en la calidad de la señal eléctrica ya que la señal adquirida no permite detectar el cambio del medio fluido con la calidad requerida.

Para evitar la degradación se han tomado medidas sencillas como disminuir el tiempo de inmersión del sensor al estrictamente necesario, emplear agua con la menor cantidad de sales minerales y una mayor calidad en la aplicación del compuesto aislante. En un principio se empleó agua destilada con cloruro de sodio para incrementar su conductividad eléctrica pero es muy complicado garantizar un suministro seguro y económico del agua con estas características. Se ha observado también que el uso de agua de la red provoca deposiciones en la punta de la aguja que incrementan la resistencia eléctrica y hace imperceptible el cambio del medio después de cierto tiempo de uso, aproximadamente 2 semanas, sin embargo es este líquido el que empleamos dado su bajo costo y el suministro está garantizado.

Se han realizado ensayos en los que se observa la influencia en la velocidad de adquisición de datos sobre la calidad de la señal de la sonda. En primer lugar es indispensable que la velocidad de adquisición cumpla con el teorema de Nyquist.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

A continuación se muestran ejemplos de señales adquiridas. La primer gráfica muestra el efecto de la deposición en la aguja corta provocando “puntos húmedos” que impiden identificar correctamente el cambio de conductividad en la sonda. En este caso la punta corta no indica con una variación suficiente de la tensión en la sonda.

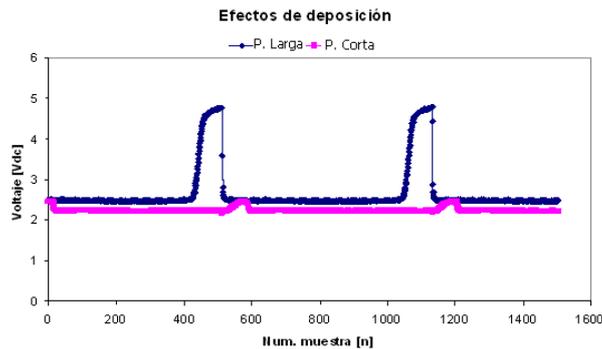


Figura 3.43 Efectos de la deposición en la sonda

En la siguiente gráfica ejemplifica los efectos de la degradación del aislante junto con la corrosión de la punta. El efecto de la degradación del aislante se observa como una caída del valor del voltaje de la señal ya que alcanza un punto máximo y cae la tensión sin llegar a su punto inicial.

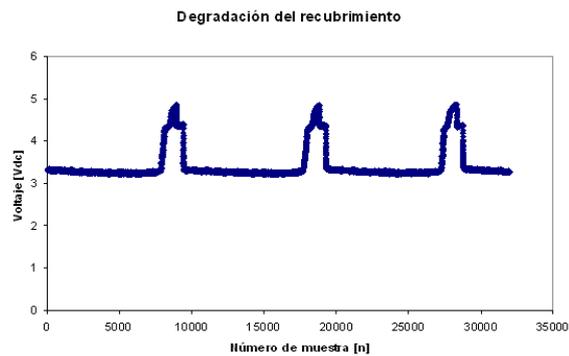


Figura 3.44 Efectos en la señal debidas a la degradación del aislamiento en una punta

Sin embargo algunos problemas han sido reportados en cuanto al tamaño y a la configuración geométrica del sensor de 4 puntas, Kataoka [4], quien observo que geometrías grandes o separación excesiva de las puntas ocasiona una gran influencia sobre la trayectoria de la burbuja modificando ésta y ocasionando burbujas “perdidas” en otros sensores, además el sensor al penetrar la burbuja puede deformar esta y alterar la medida real provocando un error adicional en la estimación de los parámetros locales. Además de ello el sensor esta limitado en la medida de burbujas grandes.

3.9 Nomenclatura

A_x	Sección de corona de área en la posición x
a_i	concentración área interfacial
cr_k	Umbral de inicio de burbuja
D_{sm}	Diámetro Sauter medio
D_{esf}	Diámetro critico para burbujas esféricas
D_{dist}	Diámetro crítico de burbuja distorsionada
D_{cap}	Diámetro crítico de burbuja cap
D_b	Diámetro crítico de burbuja slug
$D_{seccion}$	Diámetro de sección de medida
f_v	Factor de corrección de la velocidad
$f_{a,normal}$	Factor de corrección de la concentración de área interfacial debido a burbujas efectivas
$f_{a,miss}$	Factor de corrección de la concentración de área interfacial debido a burbujas no-efectivas
$f_{a,tot}$	Factor de corrección de la concentración de área interfacial total
H_{max}	Fluctuación de la velocidad lateral de burbuja
h	Altura
I	Intensidad eléctrica
I_R	Intensidad eléctrica en resistencia R
I_V	Intensidad eléctrica en resistencia V
I_m	Intensidad eléctrica del medio
j_{fx}	Velocidad de fase en el punto x
L_{inf}	Limite inferior
M	punto de contacto sonda-burbuja
N	Numero de burbujas detectadas
N_{miss}	Numero e burbujas no-efectivas
n	Numero total de burbujas
\hat{n}	vector normal unitario a la superficie de la interfase
p	presión
P_{CAiB}	Presión medida a la salida del caudalímetro de aire

Capítulo 3. Sonda de conductividad

P_{PCB}	Presión medida por sensor instalado en $z/D = 2$
p_m	Presión de mezcla
p_g	Presión de gas
ρ_f	Presión liquido
Q_{PCB}	Caudal de aire a la presión P_{PCB} en $z/D = 2$
Q_{CAiB}	Caudal de aire medido por el caudalímetro
Q_g	Caudal de aire
R	Radio de sección de medida
R_{eq}	Resistencia eléctrica equivalente total
R_{m1}	Resistencia eléctrica equivalente del lazo 1
R_{m2}	Resistencia eléctrica equivalente del lazo 2
R_T	Resistencia eléctrica total
R	Resistencia eléctrica
R_v	Resistencia eléctrica variable
\bar{S}	Distancia vectorial s
s	Separación entre puntas
T	Tiempo total de muestreo
t_g	Tiempo que ocupa la fase gaseosa
t_L	Tiempo de levantamiento de la señal en punta larga
t_C	Tiempo de levantamiento de la señal en punta corta
t	Tiempo
t_{front}	Tiempo en el la interfase recorre la distancia entre puntas S
u_{fx}	Velocidad superficial en el punto x
u_{ix}	Velocidad interfacial en la posición x
V_n	Proyección del vector velocidad real de burbuja
V_g	Volumen fase gaseosa
V	Voltaje
V_{max}	Voltaje máximo en la punta durante el tiempo de adquisición
V_{min}	Voltaje mínimo detectado por el sensor durante el tiempo de adquisición
V_{CAiB}	Volumen medido por el caudalímetro de aire
V_{PCB}	Volumen de aire a presión P_{PCB} en $z/D = 2$
v_b	Velocidad de burbuja
V_f	Volumen de fase liquida
\bar{V}_i	Velocidad real de interfase i
\bar{V}_{m0k}	Velocidad medida
\bar{x}	Vector de posición de un punto de la superficie de burbuja
\bar{x}_0	Vector de posición de un punto de contacto de la superficie de burbuja y la punta larga o sensor 0
\bar{x}_k	Vector de posición de un punto de contacto de la superficie de burbuja y la punta k
x	Posición en la dirección radial

x, y, z componentes de distancia vectorial \bar{S}

Símbolos griegos

α	Fracción de huecos
α_{ix}	Fracción de huecos en la posición x
$\eta_{y,0k}$	Angulo entre la punta k y el eje y o dirección \hat{j}
η_y	Angulo respecto al eje y
μ	Viscosidad
ρ_m	Densidad de mezcla
ρ_g	Densidad de gas
σ	Tensión superficial
Ω	Intervalo de tiempo de adquisición de señal

Subíndices

0	Tiempo inicial 0
k	Punta k
M	Punto intersección punta-superficie de burbuja
L	Larga
C	Corta
front	Frontal
miss	No-efectiva

3.10 Referencias

[Barrau1999]. E. Barrau, N. Riviere, Ch. Poupot, A. Cartellier, Single and double optical probes in air-water two-phase flows: real time signal processing and sensor performance, *Int. J. Multiphase Flow*, 25 (1999) 229-256.

[Euh2001]. D. J. Euh, B. J. Yun, C. H. Song, T. S. Kwon. Development of the five sensor conductivity probe method for the measurement of the interfacial area concentration. *Nuclear Engineering and Design*. 205 (2001) 35-51.

[Hazuku2007]. Tatsuya Hazuku, Tomoji Takamasa, Takashi Hibiki, Mamoru Ishii. Interfacial area concentration in annular two-phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 50 (2007) 2986-2995.

Capítulo 3. Sonda de conductividad

[Hibiki1998]. T. Hibiki, S. Hogsett, M. Ishii. Local measurement of interfacial area, interfacial velocity and liquid turbulence in two-phase flow, Nucl. Eng. Des. 184 (1998) 287-304.

[Ishii1975]. Thermo-Fluid dynamics theory of two-phase flow. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricite de France, Eyrolles, Paris (1975).

[Jeong2008]. J.J. Jeong, B. Ozar, A. Dixit, J.E. Juliá, T. Hibiki, M. Ishii. Interfacial area transport of vertical upward air-water two-phase flow in an annulus channel. International Journal of Heat and Fluid Flow. 29 (2008) 178-193.

[Kalkach-Navarro1993]. S. Kalkach-Navarro, R.T. Lahey Jr., D.A. Drew, R.Meyder. Interfacial area density, mean radius and number density measurements in bubbly two-phase flow. Nucl. Eng. Des. 142 (1993) 341-351.

[Kataoka1986]. Isao Kataoka, Mamoru Ishii. Local formulation and measurements of interfacial area concentration in two-phase flow. Int. J. Multiphase Flow. 12 (1986) 505-529.

[Kataoka1990] I. Kataoka, A. Serizawa, Interfacial area concentration in bubbly flow, Nucl. Eng. Des. 120 (1990) 163-180.

[Kataoka1994] I. Kataoka, M. Ishii, A. Serizawa. Sensitivity analysis of bubble size and probe geometry on the measurements of interfacial area concentration in gas-liquid two-phase flow. Nucl. Eng. Des. 146 (1994) 53-70.

[Kim1998]. S. Kim, X.Y. Fu, X. Wang, M. Ishii, Local interfacial area concentration measurement in a two-phase flow using a four-sensor conductivity probe, Trans. Am. Nucl. Soc. 79 (1998) 356-357.

[Kim2000]. S. Kim, X. Y. Fu, X. Wang and M. Ishii. Development of the miniaturized four-sensor conductivity probe and the signal processing scheme. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43 (2000) 4101-4118.

[Kocamustafaogullari1991]. G. Kocamustafaogullari, Z. Wang. An experimental study on local interfacial parameters in a horizontal bubbly twophase flow. Int. J. Multiphase Flow 17 (1991) 553-572.

[Muñoz-Cobo2007]. J.L. Muñoz-Cobo, J. Peña, S. Chiva, S. Mendez. Monte-Carlo calculation of the calibration factors for the interfacial area concentration and the velocity of the bubbles for double sensor conductivity probe. Nuclear Engineering and Design. 237 (2007) 484-496.

3.10 Referencias

- [Neal1963]. L. G. Neal, S. G. Bamkoff. A high resolution resistivity probe for determination of local void properties in gas-liquid flow. *AIChE. E. J.* 9 (1963) 490 - 494.
- [Revankar1992]. S.T. Revankar, M. Ishii, Local interfacial area measurement in bubbly flow, *Int. J. Heat Mass Transfer* 35 (1992) 913-925.
- [Revankar1993]. S.T. Revankar, M. Ishii. Theory and measurement of local interfacial area using a four sensor probe in two-phase flow. *Int. J. Heat Mass Transfer* 36 (1993) 2997-3007.
- [Serizawa1975] A. Serizawa, I. Kataoka, I. Michiyoshi, Turbulence structure of air±water bubbly flow I. Measuring techniques, *Int. J. Multiphase Flow* 2 (1975) 221-233.
- [Shen2005]. Xiuzhong Shen, Yasushi Saito, Kaichiro Mishima, Hideo Nakamura Methodological improvement of an intrusive four-sensor probe for the multi-dimensional two-phase flow measurement. *International Journal of Multiphase Flow.* 31 (2005) 593-617
- [Suzanne1998] C. Suzanne, K. Ellingsen, R. Risso, V. Roig, Local measurement in turbulent bubbly flows, *Nucl. Eng. Des.* 184 (1998) 319-327.
- [Theofanous 1982]. T.G. Theofanous, J. Sullivan. Turbulence in two-phase dispersed flows. *J. Fluid Mech.* 116 (1982) 343-362.
- [Valenti1991]. S. Valenti, A. Clausse, D.A. Drew, R.T. Lahey Jr. A contribution to the mathematical modeling of bubbly/slug flow regime transition. *Chem. Eng. Commun.* 102 (1991) 69-85.
- [Wang1987]. S.K. Wang, S.J. Lee, O.C. Jones Jr., R.T. Lahey Jr. 3D Turbulence structure and phase distribution measurements in bubbly two-phase flows. *Int. J. Multiphase Flow* 13 (1987) 327-343.
- [Wu1999]. Q. Wu, M. Ishii. Sensitivity study on double-sensor conductivity probe for the measurement of interfacial area concentration in bubbly flow, *Int. J. Multiphase Flow* 25 (1999) 155-173.
- [Wu2001]. Q. Wu, K. Welter, D. McCreary and J. N. Reyes. Theoretical studies on the design criteria of double-sensor probe for the measurement of bubble velocity. *Flow Measurement and Instrumentation.* 12 (2001) 43-51.

Capítulo 4. Instalación experimental e instrumentación

4.1 Introducción	IV - 1
4.2 Instalación experimental	IV - 3
4.2.1 Sección de ensayo	IV - 3
4.2.2 Circuito hidráulico	IV - 8
4.2.3 Sistema neumático	IV - 11
4.3 Instrumentación.....	IV - 12
4.3.1 Medida de velocidad de fase líquida.....	IV - 14
4.3.2 Medida de velocidad de fase gaseosa	IV - 14
4.3.3 Medida de la presión	IV - 16
4.3.4 Medida de la temperatura.....	IV - 18
4.3.5 Visión artificial	IV - 18
4.3.6 Anemometría Láser.....	IV - 20
4.3.7 Sonda de conductividad	IV - 22
4.3.8 Adquisición y acondicionamiento de señal.....	IV - 23
4.3.9 Incertidumbre de medida	IV - 24
4.4 Control de la instalación	IV - 25
4.4.1 Módulo de Captura.....	IV - 26
4.4.2 Procesado	IV - 29
4.4.3. Organización y presentación	IV - 30
4.5 Nomenclatura	IV - 30
4.6 Bibliografía y referencias.....	IV - 32

4.1 Introducción

La necesidad de contar con datos experimentales para validar modelos teóricos de flujo bifásico obliga a la construcción de instalaciones experimentales que permitan el estudio de las principales características de dichos flujos. En este sentido se ha diseñado y construido la instalación experimental PUMA por miembros del grupo de Termohidráulica e Ingeniería Nuclear del Instituto de ingeniería energética de la Universidad Politécnica de Valencia cuya construcción busca contribuir a la comprensión de la naturaleza del flujo bifásico, y específicamente los fenómenos de transporte en flujos líquido-gas similares a los que ocurre en los actuales reactores nucleares.

Instalaciones similares se han construido en diversas partes del mundo con la finalidad de estudiar flujos bifásicos en actividades industriales como lo son el empleo de la de energía nuclear para la generación de energía eléctrica, aplicaciones en la industria química, extracción de petróleo, etc. Estas instalaciones se diferencian entre sí por la geometría del canal de ensayo (que puede ser circular o rectangular, con varios tamaños de diámetro hidráulico y longitud), por la orientación y dirección del flujo (vertical u horizontal, contracorriente o co-corriente), por los fluidos de trabajo (agua-aire, aceite-nitrógeno, mezclas de alcohol-aire, aceites viscosos-aire caliente, etc), por las condiciones en las que se realizan los ensayos (adiabáticas, a presión atmosférica, presurización a 4 bares, etc). Otra diferencia importante en las distintas instalaciones experimentales son las técnicas empleadas en la medición de las características de flujo bifásico, así por ejemplo hay grupos de investigación que emplean técnicas de visualización y algunos otros emplean técnicas eléctricas invasivas, pero sobretodo la combinación de dos o mas técnicas de medida.

Este capítulo describe la instalación experimental PUMA y la instrumentación con la que se ha dotado para la caracterización de flujo bifásico. Una primera parte describe la construcción de la instalación y sus principales componentes. La segunda sección muestra la instrumentación que permite obtener medidas de caudal, presión, temperatura y sobretodo la medida de los principales parámetros de flujo bifásico.

Una tercer parte se dedica a la descripción del software de control que hace posible que todos los sistemas de la instalación puedan funcionar, tanto en la obtención de medidas así como en su análisis. A manera de resumen preliminar, la tabla 4.1 muestra las principales características de la instalación y su instrumentación.

4.1. Resumen de principales características de la instalación

Característica	Observaciones
Fluidos de trabajo	Fase Continua: Agua potable Fase Dispersa: Aire
Configuración del flujo	Vertical, ascendente Adiabático y presión atmosférica
Configuración geométrica	Tubería circular metacrilato Diámetro: 52 mm, Longitud: 3000 mm
Técnicas de medida empleadas	Sonda de conductividad Anemometría láser
Parámetros de flujo medidos	Concentración de área interfacial, fracción de huecos, velocidad superficial de burbuja, diámetro Sauter medio, distribución del número de burbujas, velocidad de fase líquida e intensidad de turbulencia
Instrumentación adicional	Medidor de caudal electromagnético, medidor-controlador de caudal de gas, sensores de temperatura RTD, transductores de presión manométrica.
Accesorios y suplementos	Posicionador de sonda y LDA automatizados Caudal de gas controlado desde ordenador Proceso de captura y análisis de información automatizados

4.2 Instalación experimental

En esta sección se mostrarán las características más importantes de la instalación experimental PUMA, la cual para efectos descriptivos dividiremos en tres grandes sistemas que son sección de ensayos, circuito hidráulico y sistema neumático. Los dos últimos son sistemas que hacen posible la utilización de la sección de medida.

4.2.1 Sección de ensayo

La sección de ensayo esta compuesta por todos los elementos que hacen posible la medición de las características más importantes de flujo bifásico. Sus componentes principales son cámara de mezcla, columna y separador de fases, todos ellos mostrados en la figura 4.1.



a) Cámara de mezcla



b) Columna



c) Separador de fases

Figura 4.1 Sección de ensayo

a) Cámara de mezcla

La cámara de mezcla tiene como finalidad crear las condiciones para la formación de la mezcla bifásica. Esta compuesta por una sección cónica con tres entradas radiales de 1/2" de diámetro cada una por donde se introduce la fase líquida. Por la parte superior se acopla con la columna y por la parte inferior se instala un dispositivo llamado Sparger que permite la generación de burbujas a partir de la mezcla de ambas fases.

El Sparger es un material poroso de acero inoxidable fabricado mediante compactación y sinterizado de polvo de acero inoxidable clase 316L. Estos dispositivos se emplean generalmente como elementos filtrantes. El medio poroso empleado es un modelo 850 con una espiga de 1/2" de diámetro y una porosidad media de 40 micrómetros.

4.2 Instalación experimental

Este dispositivo fue seleccionado conforme los parámetros de diseño que el fabricante proporciona: la presión de trabajo, la velocidad de la fase gaseosa, la velocidad de la fase líquida y el diámetro de la tubería en donde se alojará.

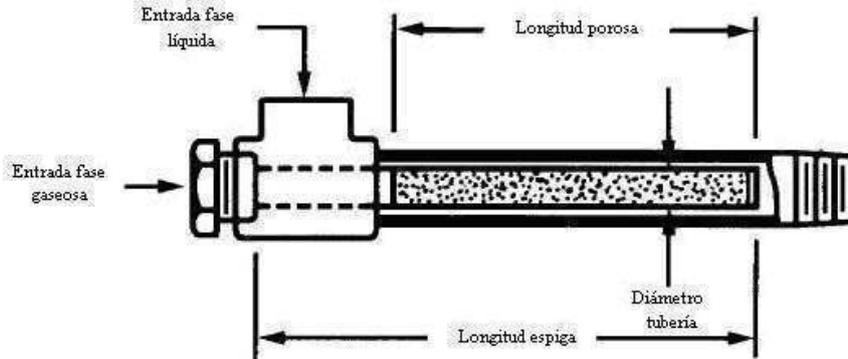


Figura 4.2 Sparger

La figura 4.3 muestra esquemáticamente el montaje del Sparger. En el interior de este ensamble la corriente de agua arrastra el aire saliente de la superficie porosa formando una corriente de burbujas de muy pequeño diámetro y una fracción de huecos muy grande. Esta mezcla bifásica primaria entra en una sección cónica en donde se mezcla con el caudal de agua de las 3 entradas horizontales restantes que tienen por objetivo disminuir la fracción de huecos y uniformizar el tamaño de burbuja. Los distintos regímenes de flujo se forman cambiando la magnitud de los caudales de agua y aire a la entrada de la cámara de mezclado, figura 4.3.



Figura 4.3 Cámara de mezcla y medio poroso

Capítulo 4. Instalación experimental e instrumentación

En nuestro diseño las condiciones iniciales de tamaño de burbuja no son controladas, es decir, el tamaño de burbuja esta dominado por el flujo de fase líquida que arrastra las burbujas de la superficie del Sparger sin que se tenga control en ello, excepto por el control de flujo de agua a la entrada de la cámara. Algunos experimentos han sido realizados por investigadores de otros grupos en donde las condiciones iniciales incluido el tamaño inicial de burbuja son controlados exhaustivamente [Kataoka1990] [Serizawa1987] [Liu1993]. En nuestro estudio no se implementó ningún sistema para éste efecto y el tamaño inicial de burbuja esta determinado por las condiciones de flujo iniciales.

Algunos trabajos experimentales han estudiado distintos métodos de generación de burbujas, y reportan en sus resultados que el método de generación de burbujas es altamente dominante en la formación y evolución de la mezcla bifásica a grado tal que bajo las mismas condiciones de flujo iniciales en una misma instalación experimental pueden ocurrir diferencias significativas en la estructura de fase debidos al empleo de diferentes métodos de generación de burbujas.

Los métodos de generación de burbujas más extendidos son superficies perforadas y/o tubos capilares, y medios porosos [Hibiki2001], [Kim1999]. Entre las desventajas de los primeros se encuentran que existe una gran perdida de carga, flujos poco homogéneos de burbujas y tamaños iniciales de burbuja relativamente grandes. Por otro lado, el empleo de medios porosos produce tamaños de burbuja relativamente pequeños, producen una dispersión homogénea de las burbujas y su construcción o implementación es sencilla. La principal dificultad en el empleo de estos medios porosos se encuentra la necesidad de filtrar exhaustivamente el líquido y gas para evitar que los micro-poros se obstruyan. Para nuestro estudio elegimos el empleo de medios porosos debido a que la literatura consultada refiere a estos elementos como una mejor fuente de producción de flujo bifásico. El Sparger debe ser manipulado con precaución ya que algún desperfecto en la superficie afectará la porosidad media y con ello el tamaño inicial de las burbujas.

b) Columna

A la salida de la cámara de mezcla se encuentra una sección de tubería llamada columna. Es de metacrilato transparente con 52 mm de diámetro interior, una longitud de 3100 mm y permite el desarrollo del flujo en la dirección axial.

4.2 Instalación experimental

En la parte inferior se encuentra unida a la cámara de mezcla mediante un conector de tres piezas de PVC y una junta tórica que evita fugas de líquido permitiendo además la orientación de la columna para una correcta alineación vertical. Mediante la medida del ángulo de inclinación fue posible alinear la columna verticalmente con un error de 0.05 grados (8.73×10^{-4} radianes).

La columna esta compuesta por tres secciones de tubería unidas mediante bridas. En tres alturas o posiciones axiales distintas (104mm, 1872mm y 2912mm) se instalaron puertos especialmente diseñados para albergar las sondas de conductividad e introducirlas en el interior de la columna¹.

Para la utilización efectiva del sistema de adquisición de imagen y el sistema LDA fue necesario construir cámaras de visualización que tienen por objetivo compensar el efecto de la difracción de la luz debida al cambio del medio aire - agua y la curvatura de la tubería de metacrilato, figura 4.4. Estas cámaras están llenas de agua descalcificada y están colocadas a lo largo de las secciones de la columna.

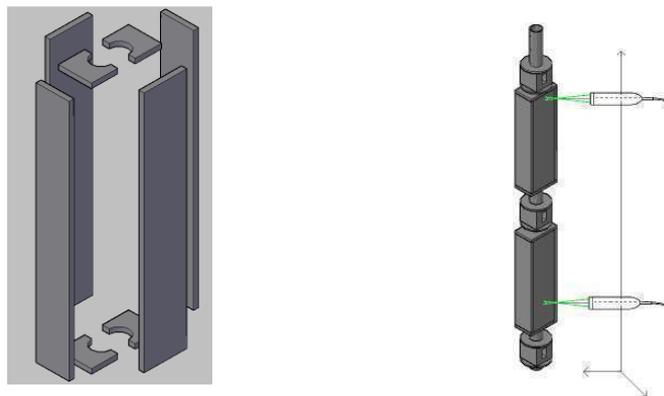


Figura 4.4 Cámara de visualización

c) Separador de fases

En la parte superior de la columna se encuentra el separador de fases cuyo objetivo es permitir la descarga de la mezcla bifásica a la presión atmosférica y realizar la separación de ambas fases impidiendo que burbujas de aire en el líquido lleguen a ser succionadas por la aspiración de las bombas de agua cuando el líquido torna al depósito. La figura 4.5 muestra una imagen del separador de fases.

¹ La descripción de este dispositivo se abordó en la sección 2.6.1



Figura 4.5 Separador de fases

Este separador de fases consiste en un depósito abierto a la atmósfera en el cual la mezcla bifásica sale de la sección de medida y va directamente a un difusor que evita que el agua caiga sobre la misma descarga, por diferencia de densidades el aire se dispersa en la atmosfera y el liquido torna al depósito mediante una red de tuberías instaladas de manera que ofrezcan la minima resistencia permitiendo el agua abandone rápidamente este separador y no se estanque en su interior.

Por seguridad la velocidad de fase líquida no debe superar 7 m/s, ello provocaría que el separador de fases no desaloje el liquido y este se desbordaría.

El empleo del separador de fases es necesario debido a que las condiciones de la descarga de la sección de medida afecta las condiciones en las que el flujo bifásico se desarrolla, esto es, si en vez de salir al separador de fases la mezcla bifásica torna directamente al depósito mediante una red de tuberías, pequeñas cantidades de aire pudieran quedar atrapadas en los cambios de dirección o nivel alterando las condiciones de presión en la sección de medida, esto provoca un cambio en la forma de la burbuja y con ello en toda la estructura del flujo bifásico. Kim y colaboradores [Kim2007] realizaron pruebas en donde demuestran experimentalmente que cambios de dirección horizontal a vertical de 90° alteran significativamente la estructura de flujo antes y después del cambio de dirección produciendo oscilaciones en el flujo y alterando la estructura de fases junto con su evolución axial.

4.2.2 Circuito hidráulico

El circuito hidráulico es el conjunto de todos los elementos que hacen posible el almacenamiento y transporte de la fase líquida durante la realización de los ensayos. Consta de un depósito de almacenamiento, un sistema de filtrado y descalcificación, bombas de impulsión, un sistema de tuberías, sección de medida, un separador de fases. La figura 4.6 muestra un diagrama descriptivo. Para explicar la función de cada componente se realizara a continuación una breve descripción.

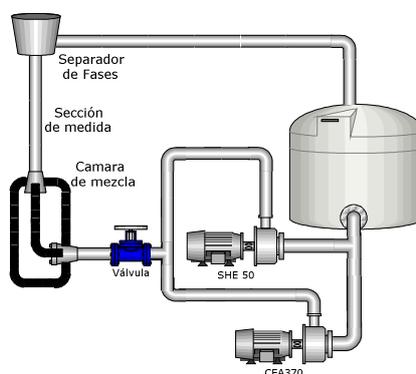


Figura 4.6 Lazo hidráulico

El agua empleada como fase líquida se obtiene de la red de agua potable. Como primer proceso de purificación es filtrada para ello se han instalado filtros a la entrada y a la salida del descalcificador.

El primer filtro retiene partículas sólidas de 50 micrómetros de tamaño, el segundo retiene partículas de 1 micrómetro. Los filtros empleados se utilizan generalmente en aplicaciones en donde los líquidos tienen contacto líquidos potables y consumibles por el ser humano.

Posterior al filtrado de partículas, a la fase líquida se realiza un proceso de descalcificación para reducir la dureza y evitar deposiciones en la instrumentación, equipo de bombeo y tubería. Antes del proceso de descalcificación, el agua tiene una dureza aproximada de 350 ppm, la dureza disminuye aproximadamente a 150 ppm después del proceso. El equipo descalcificador es de la marca INSA, modelo Serie 255 Logix 760 con capacidad de 35l.

El agua ya tratada es almacenada en un depósito de polipropileno de alta densidad con una capacidad de 750 litros, el agua almacenada no suele superar los 450 litros. La temperatura de funcionamiento admitida para este depósito es de 30°C a una presión de 0.5 bar.

Capítulo 4. Instalación experimental e instrumentación

Debido a la construcción del recinto, fue necesaria la construcción de una estructura que soportara el peso del depósito y el agua ya que el límite de carga máxima de suelo es 300kg/m^2 , cantidad superada por el depósito lleno de agua. La estructura fue anclada en el suelo del sótano del edificio y se empleó en su construcción barras de aluminio ensambladas mecánicamente. Originalmente este tipo de depósitos se emplean en el almacenamiento de combustibles, sin embargo no hay impedimento alguno para almacenar agua potable en este depósito, aunque posee el inconveniente de requerir algunas modificaciones como la instalación de la toma aspiración de las bombas.

El agua almacenada es impulsada hasta la sección de medida mediante un equipo de bombeo, el cual está formado por dos bombas con rodete de acero inoxidable de la marca LOWARA. Una de ellas es un modelo CEA 370/3 con una potencia eléctrica de 1.2kW que mediante su uso es posible obtener velocidades superficiales de la fase líquida de hasta 3m/s en la sección de medida. La segunda es un modelo SHE50-200/110 que permite alcanzar fácilmente una velocidad superficial de 7 m/s en la sección de medida.

La bomba modelo CEA 370/3, de alimentación eléctrica trifásica, está conectada a un variador de frecuencia que hace posible el control de la velocidad de giro del rodete y por tanto la regulación del caudal de líquido.

La bomba modelo SHE50-200/110 posee una potencia de 11 kW, está alimentada eléctricamente mediante un arrancador estrella – triángulo el cual inyecta corriente eléctrica para un arranque en dos etapas que tarda 8 segundos en completarse.

El caudal que proporciona esta bomba es controlado mediante una válvula de bola, indicada en la figura 4.5. Cuando la bomba SHE50 es empleada la temperatura del agua se incrementa paulatinamente y puede llegar a superar los 30°C en 1 hora. Como límite de seguridad no se permite que el agua supere los 30°C ya que podría fallar la tubería, esta información es aportada por el fabricante de la tubería y la figura 4.7 muestra la respuesta de la presión de ruptura ante el incremento de temperatura².

² <http://www.cepex.com>

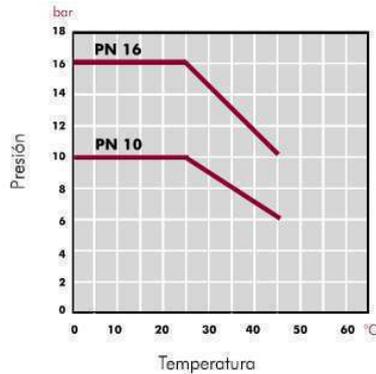


Figura 4.7 Respuesta de la tubería de PVC

El sistema de tuberías que transporta la fase líquida hasta la sección de medida está fabricada en policloruro de vinilo o PVC de 75 mm de diámetro con una rugosidad interna de pared de 0.007 mm y presión nominal de 10 Bar. El sistema de unión empleado en la tubería es mediante adhesivo que contiene ciclohexanona (25%) y tetrahidrofurano (50%). Las válvulas tipo bola instaladas están hechas con PVC de diámetro nominal de 75mm y 10Bar de presión nominal. Todos los elementos y el adhesivo de PVC son fabricados por la empresa Cepex

El caudal del agua es dividido antes de llegar a la sección de medida en un divisor de flujo, cada ramal posee una válvula que permite regular el caudal de salida. El objetivo del divisor de flujo es asegurar un suministro de agua suficiente para el correcto funcionamiento de la cámara de mezclado en la formación del flujo bifásico. La figura 4.8 muestra el divisor de flujo que consta de una sección cónica con cuatro válvulas. El diámetro de cada salida es de 12.5mm. Este divisor o colector está fabricado con elementos soldados mediante arco eléctrico de acero inoxidable.

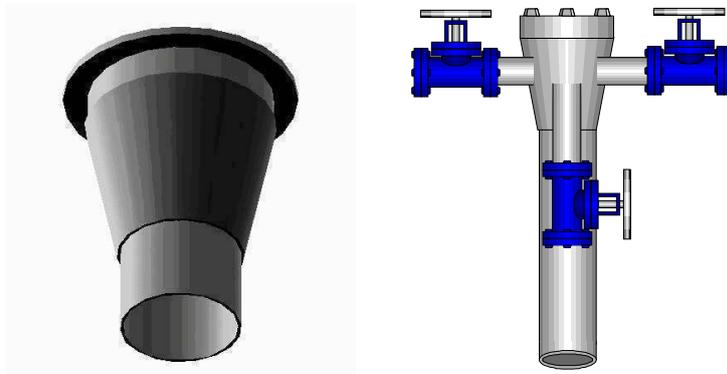


Figura 4.8 Divisor de flujo

Una vez que la mezcla bifásica se ha formado en la cámara de mezcla, entra en la columna de medida donde la instrumentación instalada permite la caracterización del flujo bifásico. En la salida de la sección de medida se encuentra el separador de fase que permite a la fase líquida tornar al depósito y la fase gaseosa salir a la atmósfera. El agua es reintroducida en el depósito de almacenamiento, en la descarga se encuentra instalado un “amortiguador” que impide que el líquido reentrante perturbe a la succión de las bombas. Este amortiguador es una sección de tubería que posee una gran cantidad de orificios por los cuales la salida del líquido se desarrolla de manera gradual.

4.2.3 Sistema neumático

El sistema neumático suministra la fase gaseosa a la sección de medida, la figura 4.9 muestra un diagrama descriptivo de éste sistema. Consta de un compresor, depósitos, filtros y válvulas, todo ello configurado de manera tal que son disponibles tres líneas de alimentación: línea de bajo caudal de aire que suministra caudales de hasta 200 ltn/min ($3.33 \times 10^{-03} \text{m}^3/\text{s}$). La línea de alto caudal de aire que proporciona hasta 1400 ltn/min ($2.33 \times 10^{-02} \text{m}^3/\text{s}$); y una última línea que inyecta aire directamente a la sección de medida cuyo propósito es facilitar labores de mantenimiento. A continuación se detallan las características más importantes de todos los elementos que componen el sistema neumático.

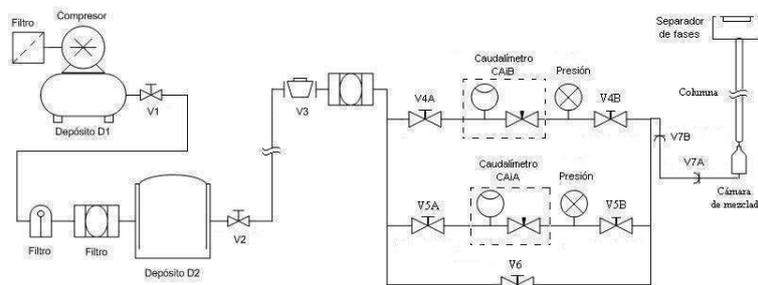


Figura 4.9 Sistema neumático

Un compresor de tornillo permite la compresión de aire a una presión de 8 Bar y caudal máximo de 1400lt/min ($2.3 \times 10^{-02} \text{m}^3/\text{s}$). El aire es almacenado en 2 depósitos, ambos con capacidad de 500 litros; el primer depósito recibe el aire comprimido directamente del compresor y el segundo amortigua el efecto pulsante debido al desplazamiento positivo del compresor. A través de todo el sistema neumático se encuentran instalados elementos filtrantes como parte del tratamiento del aire que separan el aceite, humedad y partículas sólidas del aire comprimido.

La tubería que se emplea como conducción es de acero inoxidable con un diámetro de 12mm. La regulación de caudal de aire que entra en la cámara de mezclado es efectuada desde el ordenador mediante válvulas de aguja instaladas en los medidores de caudal. Están instaladas también válvulas anti-retorno que impiden la entrada de agua a los medidores de caudal de aire debido a la recirculación accidental de la fase líquida. Una línea de conducción permite inyectar aire directamente a la cámara de mezclado para limpiar las sondas de conductividad instaladas y realizar tareas de mantenimiento.

4.3 Instrumentación

Las principales variables de control para establecer las condiciones iniciales de flujo en la realización de ensayos son las velocidades superficiales de las fases líquida y gas a la entrada de la cámara de mezclado. En esta sección se describirá el proceso mediante el cual las velocidades de fase líquida y gas son determinadas mediante la medida de caudal, presión y temperatura que se obtienen a partir de la instrumentación que para este efecto se ha instalado. La figura 4.10 muestra esquemáticamente la ubicación de los diferentes dispositivos de medición convencional instalados.

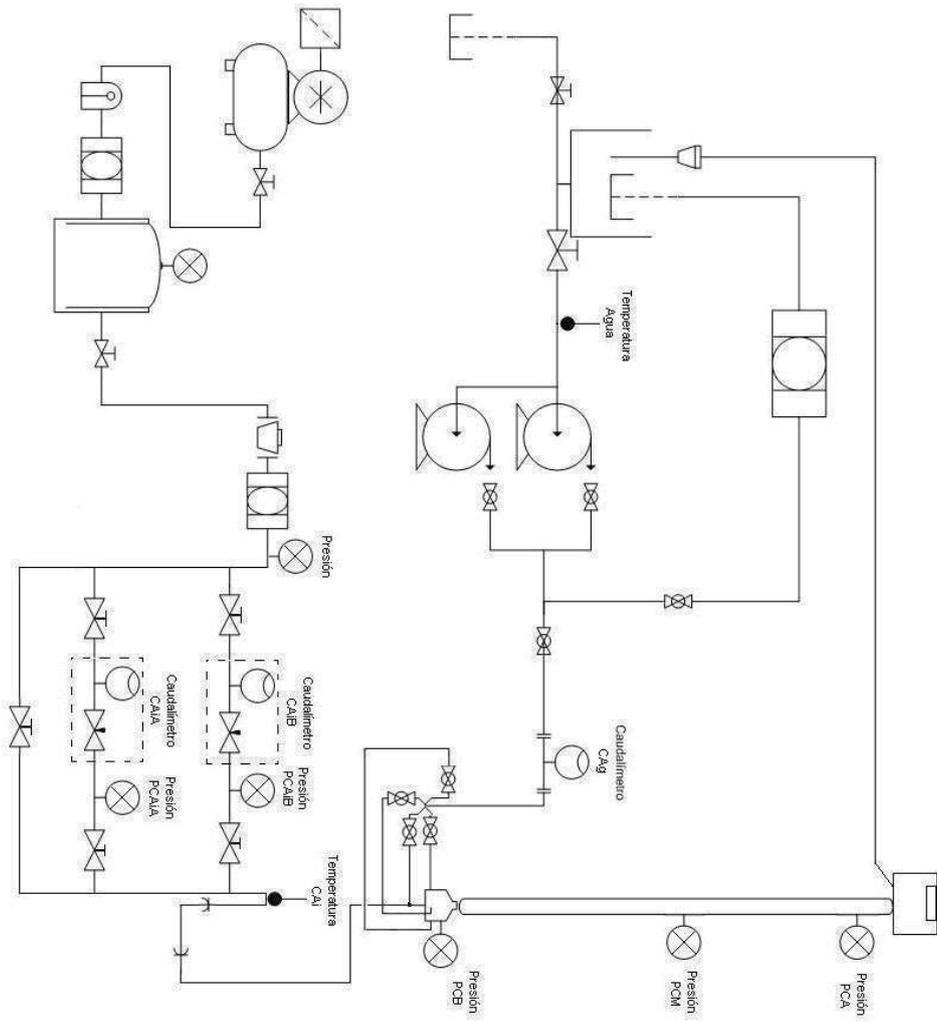


Figura 4.10 Instrumentación convencional

4.3.1 Medida de velocidad de fase líquida

La velocidad superficial de la fase líquida es medida indirectamente empleando un medidor de caudal electromagnético, el cual proporciona la velocidad de la fase líquida en un punto conocido. El medidor de caudal electromagnético instalado proporciona una medida de la velocidad superficial en un punto de medida (v_{Qa}), el diámetro de la sección de área transversal en dicho punto es conocido ($d_{Qa} = 80\text{mm}$). Esta información permite conocer el valor de la velocidad superficial del líquido a la entrada de la columna, cuyo diámetro es $d=52\text{mm}$. De este modo la velocidad superficial de la fase líquida en la sección de medida, $j_{l,0}$, es:

$$j_{l,0} = \frac{Q_{l,0}}{A} = \frac{Q_{Qa}}{A} = v_{Qa} \left(\frac{d_{Qa}}{d} \right)^2 \quad (4.1)$$

Donde $Q_{l,0}$, Q_{Qa} , A y A_{Qa} representan el caudal volumétrico de la fase líquida a la entrada de la columna y en el punto de medida respectivamente, y el área transversal de la columna o sección de medida y en el punto de medida respectivamente.

El medidor de caudal electromagnético instalado es de la marca Emerson modelo FlowTube 8705 y está acoplado a la tubería de PVC mediante bridas, proporciona una salida analógica de intensidad de corriente de 4-20mA el caudal máximo que puede medir es de 30ft/s (70m/s). Este dispositivo permite realizar medidas con una exactitud de +/- 0.25 %.

4.3.2 Medida de velocidad de fase gaseosa

Para lograr la fracción de huecos deseada, la cantidad de aire inyectado debe ser establecida por un modelo como el Drift Flux en función de la velocidad de fase líquida, la fracción de huecos deseada y otros parámetros. Por el momento no contamos con un modelo Drift Flux confiable y aunque ha sido integrado en el programa de procesamiento de la señal de la sonda los resultados obtenidos aun no son lo suficientemente fiables.

Capítulo 4. Instalación experimental e instrumentación

Para medir la velocidad superficial de la fase gaseosa que entra en la cámara de mezclado es necesario conocer, además del caudal, la presión en el punto de medida y en el interior de la cámara de mezcla, lugar en donde se descarga el aire proveniente del sistema neumático.

Para conocer esta presión se han instalado medidores a la salida de cada medidor-controlador de caudal de aire y en el interior de la cámara de mezclado. El sistema de adquisición de datos y la instrumentación empleada no permiten una medida directa de la velocidad superficial de la fase gaseosa, sin embargo proporciona suficiente información para calcular la velocidad de la fase gaseosa a la entrada de la sección de medida, $j_{g,0}$, la cual se obtiene a partir de las siguientes expresiones:

$$j_{g_0} = \frac{Q_{g_0}}{A} \quad (4.2)$$

$$Q_{g_0} = Q_{CAiB} * \left(\frac{P_{atm} + P_{CAiB}}{P_{atm} + P_{PCB}} \right) \quad (4.3)$$

Donde Q_{CAiB} , P_{CAiB} , P_{PCB} y P_{atm} son el caudal de aire medido por el caudalímetro, la presión manométrica medida justo a la salida del caudalímetro, la presión manométrica en la cámara de mezcla y la presión atmosférica respectivamente.

Para la medición de caudal de aire se han instalado 2 controladores de caudal de flujo (Mass Flow Controller), cuyos rangos van de 0 - 200lt/min. y 0 - 1400lt/min, en la figura 4.9 se identifican como CAiB y CAiA respectivamente. Estos controladores contienen un medidor de caudal y una válvula de control justo a la salida del medidor, internamente cuenta con la electrónica necesaria y un PID que controla la cantidad de aire que pasa por el medidor en función de una consigna dada por el usuario.

La presión de trabajo del medidor de caudal de aire para caudales pequeños es de 3bar y resiste sobrepresiones de hasta 7bar, mientras que el medidor de caudal de aire grande opera con una presión de trabajo de 7bar y soporta sobrepresiones de hasta 20bar. El fabricante es Bronkhorst y los modelos son MFC201A para el y MFC203AV respectivamente. El principio de medición de estos medidores-controladores másicos por efecto térmico y tiene una exactitud de +/-0.5% de fondo de escala.

Un servo-potenciómetro controlado desde la tarjeta de adquisición de datos controla el valor de la consigna del medidor de caudal pequeño, de este modo el sistema esta automatizado, no obstante mediante conexiones rápidas es posible controlar manualmente la consigna mediante una resistencia variable. El medidor manda una señal de 0-5Vdc proporcional al valor del caudal medido.

El medidor de alto caudal de aire es alimentado con una tensión de 24Vdc, la consigna es enviada mediante el puerto serial del ordenador. El valor de la medida es enviado al sistema de adquisición de datos en una señal de 0-5Vdc proporcional al valor del caudal

4.3.3 Medida de la presión

El medidor de presión instalado en la línea de bajo caudal de aire es un modelo A05 de Sensor-Technik/GMB, alimentado con una tensión de 24Vdc y que, proporciona una salida en tensión de 0 – 10vdc proporcional a la medida de presión dentro del rango de 1 a 1.0 Bar de presión manométrica. La alinea de alto caudal de aire posee un sensor marca Drucker con un rango de escala de 0-4 Bar, es alimentado con 24Vdc eléctricamente y proporciona una señal de salida de 4-20 mA proporcional a su rango de medida. Estos medidores están identificados en la figura 4.1 como PCAiA y PCBiA respectivamente

En los puertos de las sondas de conductividad se han instalado medidores de presión manométrica. Estos medidores de presión son de la marca Drucker y dependiendo su aplicación tienen rangos de 0-1 Bar para el puerto inferior, y de 0 – 250mBar para los otros dos puertos. Envían al sistema de adquisición de datos señales que van de 4-20mA y que son proporcionales a la presión. Se observó que los sensores de presión responden bien a los cambios de presión debidos al aire presente en la mezcla bifásica a velocidades bajas y a bajas fracciones de huecos, sin embargo las mediciones son muy inestables a velocidades superficiales de la fase líquida superiores a 3.0m/s y fracciones de huecos mas allá del 15%, sin embargo estos sensores de presión son de gran utilidad al momento de fijar las condiciones de ensayo iniciales, j_1 y j_g respectivamente.

La instalación de estos medidores requirió especial cuidado debido a que pequeñas burbujas de aire se introducían en las tomas de presión generando oscilaciones y errores, para ello se introdujeron tubos capilares de 1mm de diámetro para disminuir la influencia de las burbujas entrantes en la línea de toma de presión, esto mejoro la respuesta del sensor.

Capítulo 4. Instalación experimental e instrumentación

La figura 4.11 muestra un detalle de la instalación mecánica de los medidores de presión.



Figura 4.11 Instalación de los medidores de presión

La velocidad superficial de la fase gaseosa es establecida en función de la fracción de huecos deseada a una velocidad superficial de líquido establecida. Para lograr la fracción de huecos deseada, la cantidad de aire inyectado debe ser establecida por un modelo como el Drift Flux en función de la velocidad de fase líquida, la fracción de huecos y otros parámetros, pero como ya se ha comentado no ha podido establecerse un modelo adecuado y los resultados obtenidos aun no son concluyentes.

Para paliar esta falta de información, se emplea un procedimiento empírico que consiste en incrementar el caudal de aire hasta obtener una reducción de la presión en la sección de medida equivalente a la caída de presión ocasionada por la reducción del volumen de líquido debida a la presencia de aire. Dicho de otro modo, dada una velocidad de fase líquida en ausencia de aire (condición G00) existe una presión conocida en un punto de la columna que llamaremos $P_{\alpha=0}$, la cual se reducirá en un porcentaje proporcional a la fracción de huecos en ese punto ante la introducción e incremento de la cantidad volumétrica del aire en la columna, de modo que es posible determinar una fracción de huecos aproximada.

De la definición de densidad se observa que si dicha sustancia es una mezcla bifásica agua aire, la densidad de mezcla depende de las densidades de los fluidos de cada fase y de la fracción de huecos volumétrica (ecuación 4.4). Reordenando los términos (ecuación 4.5) y multiplicando por la constante de aceleración gravitacional y una altura de columna conocida obtenemos una expresión que relaciona la variación de presión y la fracción de huecos volumétrica en dicho punto (ecuación 4.7), y que puede ser empleada para establecer una presión de referencia que indica la cantidad de aire presente en la mezcla bifásica indirectamente.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_l + m_g}{V} = \frac{\rho_l V_l}{V} + \frac{\rho_g V_g}{V} = \rho_l (1 - \alpha) + \rho_g \alpha \quad (4.4)$$

$$\rho_m = \rho_l + \alpha(\rho_g - \rho_l) \quad (4.5)$$

$$P_m = P_{\alpha=0} + \alpha P_g - \alpha P_{\alpha=0} = P_{\alpha=0} - \alpha_{Teo} P_{\alpha=0} \quad (4.6)$$

$$\alpha_{Teo} = \left(1 - \frac{P_m}{P_{\alpha=0}} \right) \quad (4.7)$$

Donde α_{Teo} es la fracción de huecos deseada, $P_{\alpha=0}$ es la presión medida en ausencia de aire y P_m es la presión (que bajo esta suposición) indica que hay suficiente cantidad de aire para considerar una mezcla bifásica con fracción de huecos α_{Teo} .

También fueron instalados otros sensores de presión con la finalidad de supervisar el funcionamiento y estado de la instalación, uno de ellos se instaló en el deposito de almacenamiento de agua para medir el nivel de llenado, uno mas fue instalado justo en la alimentación neumática del sparger para comprobar la hermeticidad del sistema y evitar fugas, en los depósitos de aire y en la líneas neumáticas se instalaron medidores de carátula para supervisar las condiciones de funcionamiento de la instalación.

4.3.4 Medida de la temperatura

Los ensayos se realizan a temperatura ambiente y se efectúan mediciones de temperatura de aire en dos puntos: en el punto de medida de caudal y en la entrada del aire en la cámara de mezcla. En la cámara de mezclado también se instaló un medidor de temperatura. Todos los medidores antes descritos son termoresistencias (PT100) según la norma IEC 751 y se conectan mediante la técnica de 4 hilos. Para medir la temperatura del agua se instaló un termopar tipo K en la succión de las bombas junto con un bloque isoterma como parte del sistema de acondicionamiento de señal.

4.3.5 Visión artificial

Este sistema esta formado por dos equipos de adquisición de imagen.

Capítulo 4. Instalación experimental e instrumentación

Uno de ellos, llamado sistema BASLER-MATROX que consta de una cámara digital de alta velocidad que captura 74 imágenes por segundo (fps) a máxima resolución (1280X1024), una tarjeta de adquisición de imagen y software de control.

Este sistema nos permite adquirir imágenes en un amplio rango de configuraciones que varían según el binomio velocidad/resolución. La velocidad de muestro que empleamos es de 256 fps con una baja resolución pero suficiente para el análisis de la imagen en la calibración de la sonda de conductividad descrita en el capítulo siguiente. El software de control de éste sistema se desarrollo en MSVC/C++ y librerías de MIL-Lite, posteriormente se integro con el programa de control programado con LabView. La limitante de este sistema es la velocidad de adquisición ya que dependiendo de la configuración del sistema, la captura de imagen llega a ser lenta. La figura 4.12 muestra una imagen de este sistema.

El segundo sistema de visión artificial, el sistema PCO, consta de una cámara que captura a la misma resolución antes mencionada a más de 3000 imágenes por segundo. En este sistema el software no es integrable con el software de control por el momento, sin embargo mediante la opción de sincronización externa fue posible integrar este sistema a la instalación. La limitante en este caso es la memoria ya que se dispone solamente de 2Gb de capacidad y que, dependiendo de la configuración, sólo es posible grabar imágenes durante 2 segundos.

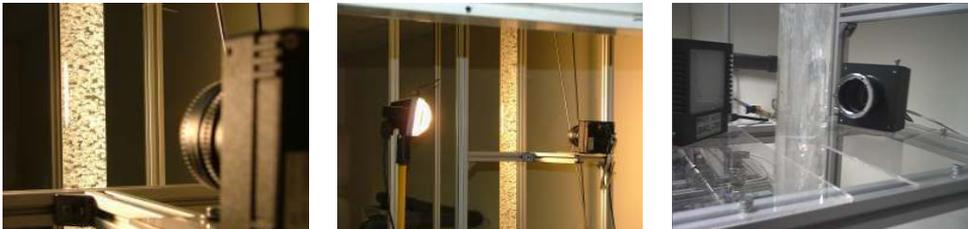


Figura 4.12 Sistema Basler

Se instaló un sistema de iluminación compuesto de 4 fuentes de luz incandescente de 500 W, una fuente de luz estroboscópica de estado sólido que funciona a alta frecuencia de disparo (hasta 62.5KHz). También existe una fuente de luz blanca de 150W que proporciona una gran cantidad de energía lumínica. La mejor opción de iluminación para la obtención de imágenes para su tratamiento digital es la iluminación de estado sólido, el problema es la baja potencia lumínica que posee, por otra parte las lamparas que son alimentadas 220Vac generan perturbaciones en la iluminación en altas velocidades debido a la frecuencia de alimentación de las mismas que es 50Hz.

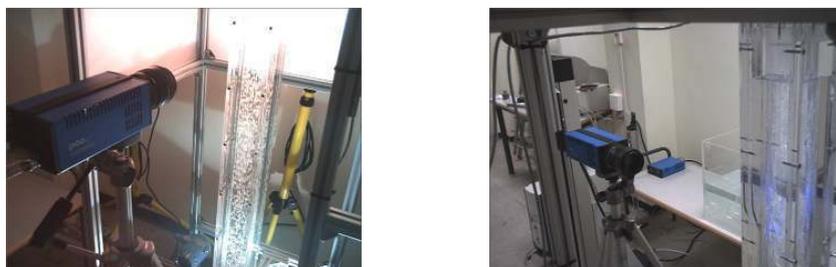


Figura 4.13 Sistema PCO

El sistema de adquisición de imagen permite la medición dimensional de los objetos fotografiados. Para ello es necesaria una calibración previa además de prestar especial cuidado a la iluminación y fuentes de ruido debido a la misma, además en el análisis se realiza una amplia gama de operaciones de tratamiento de imagen con software (IMAQ y VISION dentro de LabView). Esto permite realizar análisis de detección de bordes y contornos, mediciones de tamaño y de velocidad de la burbuja

4.3.6 Anemometría Láser

El sistema de anemometría láser posee una fuente de haz láser Argón/Criptón Ar^+ de hasta 8W.

El sistema LDA posee un colimador que separa en longitudes de onda diferentes el haz láser, esos haces son llevados mediante un transmisor de fibra óptica al lugar de medición donde el foto detector recaba las señales compuestas de los haces y son llevadas al ordenador que procesa las señales obteniendo así una distribución de velocidades en la sección de medida. Este sistema permite realizar medidas de velocidades de partículas en 2 dimensiones. Para controlar la posición del punto de medida existe un posicionador automatizado que permite una precisión de movimiento de hasta 10micrometros.

El agua de la instalación es dopada con unas partículas pequeñas de 10micrometros de tamaño mismas que son arrastradas por el líquido y que al pasar por el punto de medida reflejan el haz láser hacia el foto detector de la sonda de medida en backscattering con una distancia focal. La radiación dispersada por las partículas es recibida por dos fotomultiplicadores (uno para cada dimensión) que las convierten en señales eléctricas. El sistema permite realizar medidas de velocidades en dos dimensiones con la misma sonda, utilizando las radiaciones láser en 485 nm y 514 nm de la fuente láser de Ar^+ .

Capítulo 4. Instalación experimental e instrumentación

El sistema de procesado de las señales recibidas está basado en un autocorrelador modelo 60N10 de la firma Dantec. Es posible desplazar el punto de medida mediante tres ejes perpendiculares motorizados de control automático y con una precisión de 0.001 mm. Todo el sistema de medida está controlado por el software Floware. En la figura 4.14 se muestra un esquema del sistema LDA disponible.

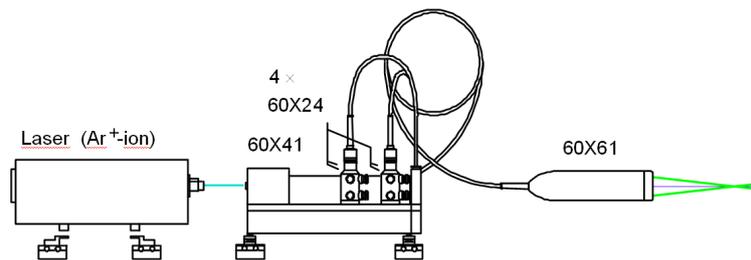


Figura 4.14 Sistema LDA de la firma Dantec

Este sistema permite la medida en dos dimensiones de la distribución de velocidades de la fase líquida. Está compuesto de una fuente de haz láser Argón/Criptón Ar⁺ de hasta 8W, un colimador que separa en longitudes de onda diferentes el haz láser, un transmisor de fibra óptica que permite llevar los haces al lugar de medición, un foto detector que recaba las señales compuestas de los haces, un ordenador de procesamiento de señales y un sistema de posicionamiento automatizado con una precisión de movimiento de hasta 10 micrómetros y desplazamiento en 3 ejes.

La fase líquida debe ser dopada con unas partículas pequeñas de 10 micrómetros de tamaño mismas que son arrastradas por el líquido y que al pasar por el punto de medida reflejan el haz láser hacia el foto detector de la sonda de medida. El sistema de procesado de las señales es un autocorrelador modelo 60N10 de la firma Dantec. Todo el sistema de medida está controlado por el software Floware. En la figura 4.14 se muestra un esquema del sistema LDA.

Este sistema se utilizará para la caracterización de velocidades del líquido. Las mediciones empleando este dispositivo se realizan en la columna de la sección de medida con ayuda de cámaras de visualización que tienen por objetivo compensar la refracción debida al cambio del medio y a la curvatura de la columna. La figura 4.15 muestra la utilización de este dispositivo en la sección de medida.



Figura 4.15 Empleo del sistema LDA en la instalación

A parte del funcionamiento estándar, durante el desarrollo de la tesis se inicio el trabajo para desarrollar un sistema PIV con los medios disponibles. El haz láser se puede emplear para adaptar el sistema de visión artificial y obtener un sistema PIV con el cual podemos medir la velocidad de burbujas y partículas dentro de márgenes de error aceptables. Este sistema se utilizará para la caracterización de velocidades del líquido que envuelve la burbuja de gas, se realizaran estudios de resolución máxima del sistema de medida y de caracterización del flujo líquido para diferentes condiciones de flujo (diámetros de burbujas, velocidad etc). Será posible estudiar la densidad máxima de burbujas medibles mediante esta técnica, las interacciones entre ellas, etc.



Figura 4.16 Fuente de haz láser empleada en PIV

4.3.7 Sonda de conductividad

La sonda de conductividad se emplea para medir los parámetros locales de flujo bifásico como son la concentración de área interfacial y velocidad superficial de burbuja, entre otros. En el capítulo anterior ya se ha explicado de forma exhaustiva la construcción y principios de funcionamiento de este tipo de sondas. Este dispositivo es construido completamente por el personal del grupo de Termo-hidráulica e Ingeniería Nuclear del Instituto de Ingeniería energética. La figura 4.16 muestra la sonda de conductividad instalada en el dispositivo que hace posible su introducción en la columna de la sección de medida.

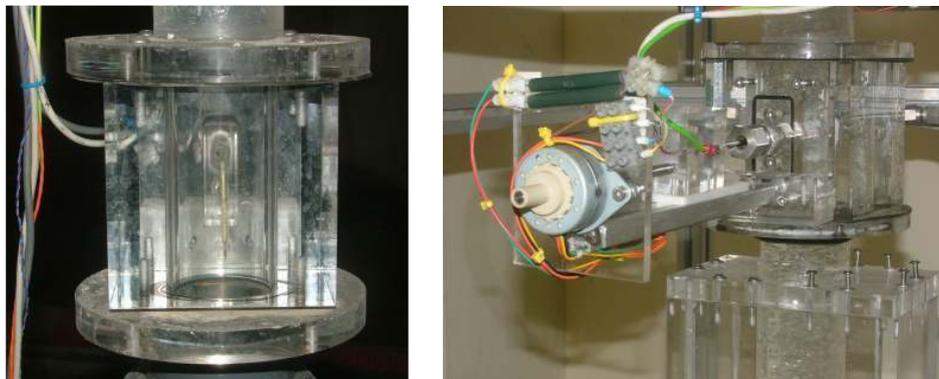


Figura 4.17 Sonda de conductividad instalada en sección de medida

4.3.8 Adquisición y acondicionamiento de señal

La señal obtenida de los sensores de caudal, presión y temperatura es filtrada en el sistema de acondicionamiento de señal SCXI para remover ruido eléctrico producido por fuentes comunes como lo son monitores de ordenador, fuentes de alimentación, de la red eléctrica, defectos en el trazado de la ruta de cableado, etc. Posteriormente las señales son enviadas a la tarjeta de adquisición instalada en el ordenador de control.

Para garantizar la exactitud y precisión de las medidas así como a reducción a la influencia de ruido eléctrico se ha cuidado la conexión eléctrica de los instrumentos de medición, la selección de las fuentes de alimentación y el trazado de las rutas de cableado para evitar interferencias y acoplamientos eléctricos. Todos los conductores eléctricos empleados son apantallados y se encuentran correctamente conectados al sistema de tierra de la alimentación eléctrica del edificio. En cuanto a la configuración del sistema de medida que se ha empleado en la conexión eléctrica la configuración Diferencial, más robusta ante los efectos de ruido eléctrico

Dos tarjetas de adquisición de datos multifunción, modelos NI-PCI6024E y NI-PCI6036E de 12 y 16 bits respectivamente, se encuentran instaladas en los ordenadores de control de la instalación. Estas tarjetas nos permiten obtener velocidades de muestreo de hasta 200 Ms/sec (doscientas mil muestras por segundo). La tarjeta de 12 bits se emplea en la adquisición de señal de los medidores de caudal, presión y temperatura. La señal proveniente de la sonda de conductividad son adquiridas exclusivamente con la tarjeta de 16 bits, que se emplea también como controladora del sistema de posicionamiento de la sonda descrito en el capítulo anterior.

La tarjeta de 12bits esta conectada con el sistema de acondicionamiento de la señal SCXI, no así la tarjeta de 16 bits debido a que el sistema de acondicionamiento de señal filtra eléctricamente la señal y modifica la información proveniente de la sonda de conductividad.

4.3.9 Incertidumbre de medida

La norma UNE define la incertidumbre como “Estimación que caracteriza el intervalo de valores en el que se sitúa, generalmente con una alta probabilidad dada, el valor verdadero de la magnitud de medida”.

En la práctica la incertidumbre de una medida indirecta es debida a la incertidumbre misma del equipo de medida y la incertidumbre del proceso de cálculo.

$$U_{RC} = \sqrt{U_{patrones}^2 + U_{proceso}^2} \quad (4.8)$$

Para delimitar los errores asociados a la instrumentación se realizó un análisis de incertidumbre de medida. Entre las magnitudes evaluadas se encuentran la concentración de área interfacial, la fracción de huecos, la velocidad local de la fase líquida y la velocidad superficial de la interfase. El error asociado a cada una de estas magnitudes depende de las incertidumbres de los instrumentos de medida empleados. Partiendo de la ley de propagación de errores [Taylor1982]:

$$\varepsilon_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f(y)}{\partial x_i} \right|^2 \varepsilon_i^2} \quad (4.9)$$

Donde:

ε_y : Error absoluto de la magnitud y ,

f : Función que describe la magnitud y

x_i : Variables independientes de la función f ,

ε_i : Incertidumbre del instrumento que mide la propiedad x_i .

A partir de la ley de propagación de error y de las expresiones que determinan las variables antes mencionadas.

4.4 Control de la instalación

En esta sección se describirá el software de control desarrollado para el control de esta instalación y para el procesamiento de la información generada. En todos los casos la señal recibida de los instrumentos de medición es acondicionada, tratada y analizada. Solo en algunos casos este proceso es diferente en cuanto a ejecución pero en general se sigue la misma secuencia.

El software de control de la instalación PUMA fue desarrollado en Labview y emplea herramientas de adquisición de datos, sincronización de equipo mediante puerto RS-232, control PID, control de movimiento, análisis de la señal, subrutinas en fortran, matlab y MSVC/C++ y generación de reportes con aplicaciones de Microsoft Office.

El programa es ejecutado en dos ordenadores simultáneamente que son PUMA-CTRL encargado del control y adquisición de datos de la instalación, y PUMA-Visión encargado de la adquisición de datos, tratamiento de la señal y el control de todos los sistemas que soportan el uso de la sonda de conductividad. El ordenador PUMA-Visión originalmente se encargaba del control de los sistemas de visión artificial PCO y BASLER-Matrox, sin embargo debido a la carga de trabajo y a la cantidad de información que manejaba fue necesario emplear un tercer ordenador llamado PUMA-PCO.

Un cuarto ordenador llamado PUMA-LDA se emplea en el control del equipo LDA y sus sistemas auxiliares como son el procesador de señal y el sistema de posicionamiento, además realiza el procesado de toda la información y la organiza para ser analizada. La figura 4.18 describe esquemáticamente la función de cada ordenador que se detallara a continuación.

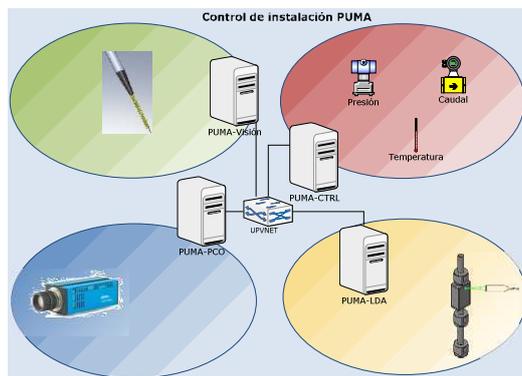


Figura 4.18 Control de la instalación PUMA

El programa de control de la instalación, Acamapixtli.vi, se compone de módulos que trabajan en conjunto realizando la captura de la información, el procesado y su organización para ser analizada. Cada una de dichas actividades es desarrollada por un módulo. La figura siguiente expone los módulos que integran el software de control.

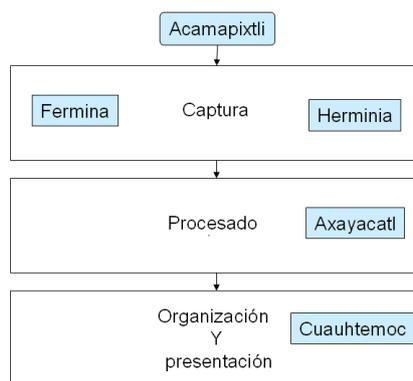


Figura 4.19 Módulos del programa de control

4.4.1 Módulo de Captura

Este módulo está compuesto por los subprogramas Fermina y Herminia. El programa Herminia se encarga de la adquisición de señal de la sonda, mientras que Fermina se encarga del control de la instalación así como de la adquisición de datos y procesamiento de las medidas de caudal, presión y temperatura. Estos módulos son ejecutados simultáneamente en los ordenadores PUMA-CTRL/Fermina y PUMA-Visión/Herminia permitiendo la comunicación mediante el puerto serie. En esta aplicación el esclavo es el ordenador PUMA-Visión.

a) Fermina

Este programa es ejecutado en el ordenador PUMA-CTRL. El programa comienza cargando desde un archivo Excel *condiciones.xls* las condiciones de ensayo y nombres que identificaran a cada, por ejemplo F02AG03 indicara condición de flujo de la fase líquida F02A y condición de flujo de fase gaseosa G03. Posteriormente es seleccionando el medidor de caudal de aire de las dos opciones posibles y el usuario introduce como controlará el caudal de aire: manualmente o mediante software.

Capítulo 4. Instalación experimental e instrumentación

Originalmente el caudal de agua era también controlado desde el ordenador mediante una red Profibus que comunicaba al ordenador con el variador de frecuencia de la bomba CEA350 pero el programa se ralentizaba excesivamente razón por la cual se eliminó esta parte del programa, desde entonces el caudal de la fase líquida se controla manualmente. Una vez que las condiciones de flujo de la fase líquida se han establecido el programa o el operario controla las condiciones de flujo de la fase gaseosa.

Los medidores de presión se emplean entonces para indicar de manera empírica e indirecta una fracción de huecos aproximada en la sección de medida³. Mediante una consigna proporcionada por las condiciones de ensayo el programa compara el valor de las fracciones de huecos obtenidas a partir de los sensores de presión y la consigna, entonces el valor del caudal de aire es ajustado.

El criterio para conocer cuando las condiciones de flujo son estables es analizando la desviación de los datos adquiridos a partir de los instrumentos de caudal de líquido y gas que debe ser menor al 5%, esto se conoce obteniendo el valor medio y la desviación estándar de los valores a comparar (presión en puerto de sonda en la posición axial $z/D = 56$ con una sola fase y en flujo bifásico⁴). La frecuencia de adquisición es de 1000 muestras/segundo.

Cuando las condiciones de flujo son estables entonces el ordenador PUMA-CTRL envía el nombre con el cual guardara la información obtenida a partir de la sonda de conductividad y las posiciones radiales r/R al ordenador PUMA-Visión, a su vez el ordenador PUMA-Visión responde indicando que ha comenzado sin errores el proceso de posicionamiento y adquisición de señal de la sonda de conductividad. En ese instante el programa de control Fermina comienza a adquirir datos de caudal, presión y temperatura de los instrumentos de medida instalados, a la tasa de adquisición de 1000 muestras/segundo, promedia los valores y los registra en un archivo. Este ciclo es repetido hasta que el ordenador PUMA-Visión informa que ha terminado con la captura de la sonda de conductividad y ha posicionado la sonda en su ubicación original, entonces PUMA-CTRL detiene la adquisición de datos, guarda la información en archivos de texto y reanuda la supervisión del sistema en espera de cambiar a la siguiente condición de ensayo. Cuando todas las condiciones se han obtenido el programa permanece en espera a ser terminado por el usuario.

³ Se explica con detalle en la sección 3.3.2

⁴ Este procedimiento se detalla en la sección 3.3.2

4.4 Control de la instalación

La supervisión de las variables de control consiste en comparar las medidas de presión, temperatura y sobretodo caudales con la finalidad de operar en condiciones seguras. El límite permisible de temperatura es 30 C por seguridad, la presión es indicador aproximado de la fracción de huecos, los valores de caudal indican las condiciones de flujo que se ensayaran y no debe superar la fase liquida velocidades de 7m/s, por seguridad.

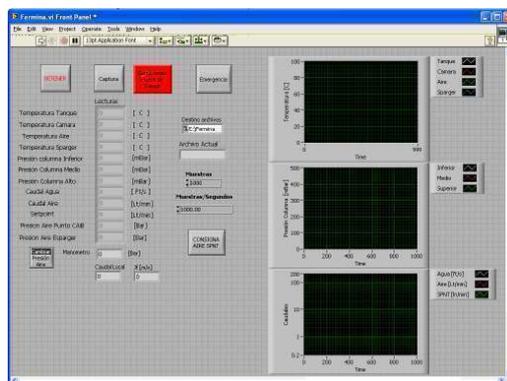


Figura 4.20 Panel frontal del módulo Fermina

b) Herminia

El ordenador PUMA-Visión ejecuta el programa Herminia al mismo tiempo que Fermina es ejecutado en Puma-CTRL, ello con el fin de lograr una comunicación entre ambas efectiva. El ordenador visión permanece en espera hasta que recibe una orden de inicio tras la cual comienza con el posicionamiento de la sonda de conductividad en una posición radial r/R contenida en el archivo de configuración Posiciones.txt o recibida desde el ordenador PUMA-CTRL, captura la señal de la sonda a una velocidad de 15000 muestras/segundo durante 30 segundos, posteriormente registra la información junto con la velocidad de muestreo y el número de puntos o valores adquiridos por cada punta en un archivo texto con un formato especial para su posterior procesado, en el módulo Axayacatl.vi.

En el inicio de la adquisición de datos de la sonda de conductividad, el programa genera una nota de aviso recordando la condición que se esta ensayando así como un recordatorio para iniciar la adquisición de medidas con el sistema LDA y la captura de imágenes con la cámara de alta velocidad PCO. La figura 4.21 muestra los subprogramas que contiene el programa Herminia.

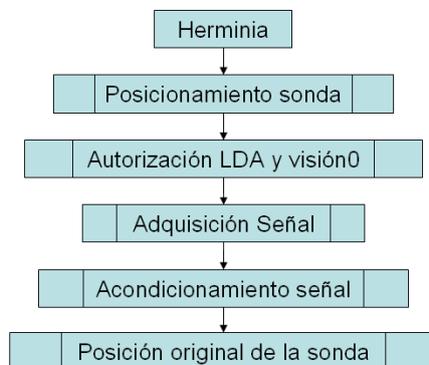


Figura 4.21 Estructura de la subrutina Ferminia

Cuando la adquisición de señal termina, la sonda ha recorrido todas las posiciones y automáticamente el software regresa la sonda a su posición inicial, envía una palabra Bolena al ordenador PUMA-CTRL para indicar que ha terminado y que espera una nueva captura de información cuando las condiciones de flujo sean estables.

4.4.2 Procesado

Una vez que se han adquirido todas las condiciones de ensayo planeadas, se procede al procesamiento de la señal de la sonda, DAQ y LDA. Esto se logra en tres módulos distintos llamados 4pt300, DAQ y LDA respectivamente

El programa 4pt300.exe de procesamiento de señal se desarrollo en fortran⁵, ello debido a la potencia que posee este lenguaje de programación en aplicaciones matemáticas y de cálculo. Los resultados del procesado se obtienen en un archivo llamado temp.tab, del cual se obtienen las mediciones de los principales parámetros de flujo locales y se incorporan, mediante las herramientas de generación de reportes de Labview, en una plantilla predefinida.

El modulo llamado DAQ recupera todos los archivos de texto generados en la adquisición de datos de caudal, presión y temperatura, procesa la información y la incorpora en la plantilla correcta, en la hoja de libro llamada DAQ.

⁵ El código fuente de este programa se detalla en el capítulo 2, sección 5.7 Esquema de procesado de la señal

Por último el procesado de la información generada por el sistema LDA se realiza empleando una subrutina desarrollada en MATLAB. Al igual que en el programa 4pt300.exe, esta subrutina se ejecuta desde Matlab y el resultado del procesado es administrado por Labview.

La información generada por el sistema LDA se encuentra registrada en archivos de texto que contienen las mediciones de velocidad en dos direcciones (radial y axial) y mediante una subrutina desarrollada en Matlab la información se procesa y se guarda en el archivo lda.xls. Esta subrutina se desarrolló fuera de Labview por que Matlab posee una herramienta de filtrado que resulta muy útil en el procesado de esta información y cuya implementación en Labview es mas elaborada, Dicha subrutina es el comando *medfilt2(A,[mn])* que es un filtro en 2D frecuentemente empleado en el análisis de imagen digital.

4.4.3. Organización y presentación

Los archivos temp.xls, DAQ.xls y LDA.xls son introducidos en el archivo plantilla.xls, lo cual se logra con el empleo de las librerías de generación de reportes que posee Labview y que permiten crear documentos de Word y Excel de manera automatizada. Es necesario definir previamente un archivo llamado plantilla.xls que incorpora los cálculos necesarios para hacer accesible la información generada por la sonda de conductividad y el LDA. El resultado final es la presentación de la información de los parámetros locales de flujo medidos con la instrumentación de la instalación puma.

4.5 Nomenclatura

A	Área transversal de sección de medida
d	Diámetro sección de medida
d_{Qa}	Diámetro en el punto de medida del caudal
f	Función que describe la magnitud y
$j_{l,0}$	Velocidad superficial inicial fase líquida
$j_{g,0}$	Velocidad superficial inicial fase gaseosa
m	Masa
P_{CAiB}	presión manométrica medida justo a la salida del caudalímetro
P_{PCB}	la presión manométrica en la cámara de mezcla
P_{atm}	Presión atmosférica respectivamente.
$P_{\alpha=0}$	Presión en la columna sin presencia de aire
P_m	Presión en columna si existe una fracción de huecos α_{Teo} .
$Q_{l,0}$	Caudal volumétrico de la fase líquida a la entrada de la columna

Capítulo 4. Instalación experimental e instrumentación

Q_{Qa}	Caudal volumétrico de la fase líquida en el punto de instalación del caudalímetro
Q_{CAiB}	caudal de aire medido por el caudalímetro
U	Incertidumbre de medida
U_{patron}	Fuentes de incertidumbre de calibración
$U_{proceso}$	Fuentes de incertidumbre de procesos
V	Volumen
v_{Qa}	Velocidad superficial en un punto de medida
x_i	Variables independientes de la función f

Símbolos griegos

α_{Teo}	fracción de huecos teórica en la columna
α	
ϵ_y	Error absoluto de la magnitud y
ϵ_i	Incertidumbre del instrumento que mide la propiedad x_i
ρ	Densidad

Subíndices

$g,0$	Condición inicial fase gaseosa
i	Instrumento
$l,0$	Condición inicial fase líquida
Patrón	Patrón de medida
PCB	Presión caudal aire en $z/D = 2$
Proceso	Proceso de medida
Qa	Caudal de líquido en punto donde está instalado el caudalímetro
$QCAiB$	Caudal de gas en punto donde está instalado el caudalímetro
Teo	Teórica
y	Magnitud física y

4.6 Bibliografía y referencias

[Hibiki2001]. Takashi Hibiki, Mamoru Ishii, Zheng Xiao. Axial interfacial area transport of vertical bubbly flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 44 (2001) 1869-1888

[Kim1999]. S. Kim. Interfacial Area Transport Equation and Measurement of local interfacial Characteristics. PhD Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, USA. (1999).

[Kim2007]. Seungjin Kim, Jung Han Park, Gunol Kojasoy, Joseph M. Kelly, Shawn O. Marshall. Geometric effects of 90-degree Elbow in the development of interfacial structures in horizontal bubbly flow. *Nuclear Engineering and Design*. 237 (2007) 2105-2113.

[Kataoka1990]. I. Kataoka, A. Serizawa, Interfacial area concentration in bubbly flow, *Nucl. Eng. Des.* 120 (1990) 163-180.

[Liu1993]. T.J. Liu. Bubble size and entrance length effects on void development in a vertical channel. *Int. J. Multiphase Flow*. 19 (1993) 99-113.

[Serizawa1987]. A. Serizawa, I. Kataoka, I. Michiyoshi, Phase distribution in bubbly flow. *Proceedings of the Second International Workshop on Two-Phase Flow Fundamentals, Data Set No.24, 1987*

[Taylor1982]. [Taylor1982]. Taylor J R, *An Introduction to Error Analysis. The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. University Science Books (1982).

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales

5.1 Introducción	V - 1
5.2 Ensayos F	V - 2
5.2.1 Objetivos	V - 2
5.2.2 Configuración del experimento.....	V - 2
5.2.3 Resultados	V - 10
5.3 Ensayos B-E	V - 21
5.3.1 Objetivos	V - 21
5.3.2 Configuración del experimento.....	V - 21
5.3.3 Resultados	V - 26
5.4 Ensayos A	V - 33
5.4.1 Objetivos	V - 33
5.4.2 Configuración del experimento.....	V - 33
5.4.3 Resultados	V - 38
5.5 Referencias	V - 42

5.1 Introducción

Se presenta en este capítulo el diseño del experimento y los resultados obtenidos. Se desarrollaron tres familias de ensayos, que serán llamadas ensayos F, ensayos B-E y ensayos A. En cada tipo de ensayo es descrito en primer lugar el objetivo que persigue su realización, posteriormente se muestra la configuración del experimento (localización de puntos de media de LDA, sonda y condiciones de flujo iniciales) y por último se presentan los resultados obtenidos. El capítulo siguiente ofrece el análisis de los resultados presentados en este capítulo.

Recordemos que los objetivos de esta tesis son principalmente el desarrollo de un sistema de medida que permita obtener información experimental sobre los parámetros de flujo bifásicos y principalmente la concentración de área interfacial. En este sentido y a manera de una base de datos experimental prototipo se presentan los resultados obtenidos hasta el momento. Estos resultados experimentales y su análisis pretenden demostrar la capacidad del sistema de medida y la instalación experimental construida para este propósito.

La tabla 5.1 muestra información general acerca del tipo de ensayo a manera de resumen, se muestran de manera general los objetivos que se persiguen, así como las características más importantes de cada uno de ellos.

5.1 Características generales de los ensayos

Ensayo	Objetivo	Características
F	<ol style="list-style-type: none"> 1. Medida de los principales parámetros locales de flujo bifásico 2. Medición de la turbulencia 3. Efecto de la geometría de la sonda 	<ul style="list-style-type: none"> - Medidas de la velocidad superficial del líquido en dos posiciones axiales - Dos configuraciones geométricas para la sonda
A	<ol style="list-style-type: none"> 1. Transición de régimen de flujo bubbly a slug: iniciación 2. Estudio de la evolución del pico de pared 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor concentración de locaciones de medida radiales con la sonda - Incremento suave de la velocidad superficial de la fase gaseosa a la entrada de la cámara de mezcla
B-E	<ol style="list-style-type: none"> 1. Efectos en los parámetros principales de flujo bifásico debido a cambios en la tensión superficial 2. Respuesta de la sonda ante cambios en el tamaño de burbuja 	<ul style="list-style-type: none"> - Para mismas condiciones de flujo, distintas propiedades de la fase líquida

5.2 Ensayos F

5.2.1 Objetivos

Son tres los objetivos principales que se buscan en la realización de este grupo de ensayos. El primero es la obtención de medidas experimentales de los perfiles radiales de los principales parámetros de flujo bifásico empleando la sonda de conductividad y el sistema de anemometría láser, con el que se obtienen perfiles de velocidades de la fase líquida y con ello es posible medir la turbulencia, segundo objetivo. El tercer objetivo es la comparación de las medidas obtenidas a partir de dos configuraciones geométricas distintas de la sonda de conductividad, esto debido a que la información disponible hasta el momento en la literatura reporta la utilización de las dos configuraciones geométricas aquí expuestas.

Aunque las dimensiones son las mismas, la ubicación de la punta larga en la sonda de conductividad fue distinta. Cabe señalar que las medidas de los principales parámetros locales de flujo bifásico realizadas en condiciones de flujo similares en ambas configuraciones geométricas de la sonda de conductividad.

5.2.2 Configuración del experimento

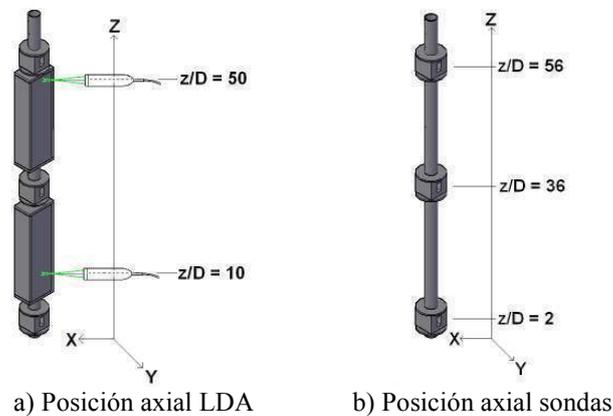


Figura 5.1 Posición axial del sistema LDA y sondas

La figura 5.1 muestra las posiciones axiales en las que se instalaron en la columna de la sección de medida el sistema LDA, figura 5.1.a, y las sondas de conductividad, figura 5.1.b, para los ensayos F.

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales

Con ayuda de los sistemas de posicionamiento automático las tres sondas de conductividad instaladas en los puertos fueron colocadas en 15 diferentes posiciones radiales que cubren el rango de $r/R = 0.02$ a $r/R = 1.0$ mostradas en la tabla 5.2. El recorrido de la sonda comienza en la posición más cercana a la pared de la columna y termina en el centro de la columna de la sección de medida.

5.2 Posiciones radiales de la sonda

ID	Separación de pared [m]	r/R [-]
r01	0.5	0.02
r02	1.5	0.06
r03	2.5	0.10
r04	3.5	0.13
r05	4.5	0.17
r06	5.5	0.21
r07	7	0.27
r08	10	0.38
r09	13	0.50
r10	15	0.58
r11	17	0.65
r12	19	0.73
r13	21	0.81
r14	23	0.88
r15	26	1.00

La figura 5.2 muestra esquemáticamente el posicionamiento radial de la sonda desde la vista inferior del puerto de medida. La figura 5.3.a es una imagen fotográfica de la sonda de conductividad en la posición más cercana a la pared, existe una distancia menor de 0.5mm entre la pared y la punta más cercana a ella debido a la construcción de la sonda; en la imagen 5.3.b se observa de manera esquemática las diferentes posiciones que ocupa la sonda en el interior de la sección de medida: el recorrido comienza en la posición cercana a la pared ($r/R = 1$) y termina en el centro de la sección de medida ($r/R = 0$), la distancia r hace referencia a la distancia a partir del centro de la sección de medida hacia la pared, por lo tanto r/R es una posición relativa al radio de la sección de medida, figura 5.3.c.

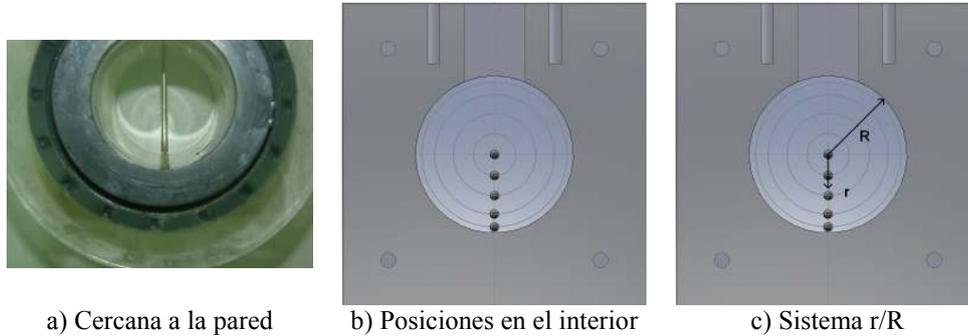


Figura 5.2 Posición radial sonda

En los ensayos F se emplearon dos configuraciones geométricas de la sonda de conductividad. En la primera de ellas, llamada F0X y que se muestra en la figura 5.3.a, forman dos puntas cortas y la punta larga un triángulo equilátero de 0.45mm lado y en el exterior se encuentra localizada la punta corta 1 separada 0.4mm de la punta larga en la dirección de la bisectriz del ángulo cuyo vértice esta representado por la punta larga. La separación axial entre puntas larga-corta 1 es de 2.2mm.

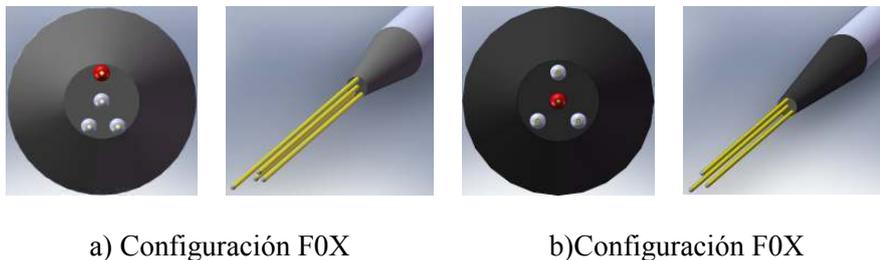


Figura 5.3 Configuraciones geométricas

La segunda configuración se denominará como F0XA mostrada en la figura 5.3.b, la letra *A* indica que la punta larga se encuentra fuera del triángulo formado por las puntas cortas. En la figura 5.3 la punta larga es indicada con color rojo.

a) Condiciones de flujo iniciales

La velocidad superficial de la fase líquida fue establecida en el rango de 0.5 a 4.0 m/s. Se eligieron estos valores por que existe información experimental próxima a estas condiciones de flujo reportada por otros autores y que podría ser contrastada. La velocidad superficial de fase gaseosa varía de 0.33m/s a 2.18m/s, con estas velocidades se busca formar mezclas bifásicas con fracciones de huecos que se encuentren dentro del rango de 5 a 25%.

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales

La elección de estas condiciones de flujo iniciales busca crear regímenes de flujo bubbly y en transición bubbly-cap/slug. La metodología para establecer la velocidad superficial de gas es un procedimiento empírico que consiste en incrementar el caudal de aire hasta obtener una reducción de la presión en la sección de medida equivalente reducción del volumen de líquido debido a la presencia de la fase gaseosa. Este procedimiento se explica con detalle en el capítulo 4, sección 4.3.

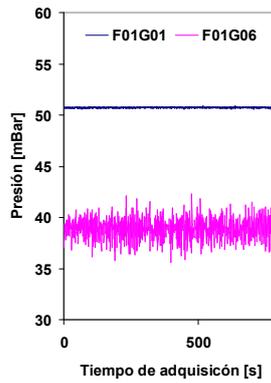
5.3 Reducción de presión debida a la presencia de aire en la columna

Ensayo F01			z/D = 56			
Condición	j_f [m/s]	j_g [m/s]	PCA [mBar]	Reducción [%]	VF Sonda [%]	Error [%]
G00	0.510	0.000	53.65	0.00	0	0.00
G01	0.513	0.035	50.90	5.14	5.56	8.19
G02	0.516	0.077	48.27	10.03	10.39	3.64
G03	0.519	0.125	45.55	15.11	15.73	4.13
G04	0.521	0.176	42.95	19.95	21.1	5.77
G05	0.523	0.257	42.01	21.70	25.87	19.24
G06	0.525	0.338	40.58	24.38	26.87	10.23

La tabla 5.3 muestra un ejemplo de los la fracción de huecos obtenidas a partir de la medida de presión y de la medida de la sonda FOX en la posición axial $z/D = 56$. Los valores j_f y j_g representan la velocidad superficial de fase líquida y gaseosa respectivamente, los valores PCA (Presión de Columna Alto, en $z/D = 56$) indican las medidas de la presión manométrica en la respectiva posición axial. Es posible asumir que la reducción en la medida de la presión en la posición $z/D = 56$ es aproximada a la fracción de huecos en ese punto. La tabla indica errores pequeños respecto al valor de la fracción de huecos medida con la sonda de conductividad, errores menores a 10% cuando la fracción de huecos medida con la sonda de conductividad es inferior a 20%. Cuando supera este valor la fracción de huecos los medidores de presión presentan una gran variación en la medida que proporcionan, debido en parte a la presencia de flujos slug que crea oscilaciones en la presión que afectan la medida del sensor de presión, además se ha observado que a velocidades superiores de 2 m/s de la fase líquida los medidores de presión proporcionan una mayor dispersión en su medida.

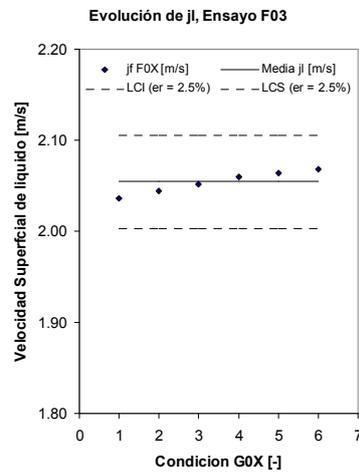
La gráfica 5.1 muestra la medida del sensor de presión cuando la velocidad superficial de fase líquida es 0.5m/s, los valores F01G01 se obtuvieron con 5% de fracción de huecos mientras que los valores F01G06 se obtuvieron con 30% de fracción de huecos.

Se observa que existe una mayor variabilidad en la segunda condición, la desviación estándar en la primera condición es 21 veces menor que en la segunda.



Gráfica 5.1 Medida de presión

A una mayor concentración de aire en la mezcla aumenta la desviación de la medida ocasionada por vibraciones, oscilaciones en la presión y la intrusión de pequeñas burbujas dentro de la línea del medidor de presión. Esto demuestra que este procedimiento empírico es útil a bajas velocidades de fase líquida y a bajas fracciones de huecos.

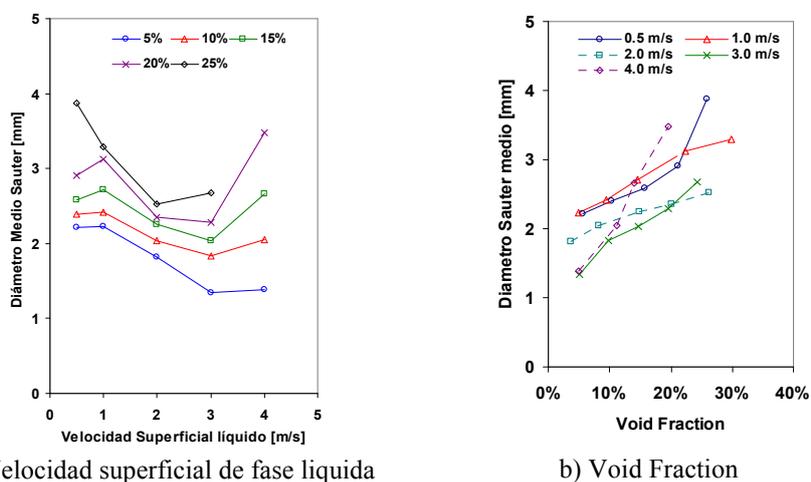


Gráfica 5.2 Evolución de j_l para ensayo F03 ($j_f=2$ m/s)

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales

Una suposición importante es que el cambio de la velocidad superficial de la fase líquida debido a la inyección de aire en la columna es despreciable estadísticamente hablando: la variación de la velocidad superficial de la fase líquida debida a la introducción de aire en el flujo es relativamente baja como es lo muestra la gráfica 5.2. En dicha gráfica se muestra el cambio de la velocidad superficial del líquido de una condición de flujo, F02. El error respecto al valor inicial no suele superar el 5%. Sólo cuando las condiciones de flujo de máximo caudal de aire ocurren la desviación supera ligeramente el 5%.

La distribución y desarrollo de la estructura de fase depende fuertemente de las condiciones iniciales (tamaño de burbuja, método de formación de mezcla bifásica y condiciones de mezclado), de las condiciones de flujo (velocidades de fase y propiedades físicas) y de la configuración de la sección de ensayos (geometría y superficie de pared). La sección de ensayos empleada en todos los ensayos es descrita en la sección 3.2, las condiciones de flujo se mostraran a continuación. En estos experimentos no se controla el tamaño inicial de la burbuja, algunos autores efectuaron experimentos en los que si controlaban el tamaño inicial de burbuja [Kataoka1990] [Serizawa1987] [Liu1993]. En éste trabajo el tamaño de burbuja inicial varía respecto a las condiciones de flujo iniciales impuestas.

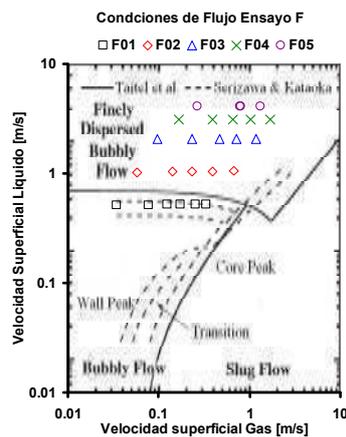


Gráfica 5.3 Tamaño inicial de burbuja

La gráfica 5.3 muestra el tamaño inicial de burbuja en función de la velocidad superficial de fase líquida (gráfica 5.3.a) y de la fracción de huecos (5.3.b) medida con la sonda en la posición axial $z/D = 2$.

Se observa que el tamaño de burbuja inicial disminuye conforme se incrementa la velocidad de fase líquida, excepto para la velocidad de 4 m/s. De igual manera se observa que aumenta el tamaño inicial de burbuja con respecto al incremento de la fracción de huecos.

La gráfica 5.4 muestra las velocidades superficiales de las fases líquida y gaseosa en un mapa de flujo. Las condiciones establecidas cubren el régimen flujo bubbly finamente disperso en un amplio rango. Durante la ejecución del ensayo se observó en la mayoría de los casos a partir de una fracción de huecos de 20% comienzan a visualizarse cambios en la estructura de fase en el centro de la columna.



Gráfica 5.4 Condiciones de ensayo en un mapa de flujo

Se establecieron 5 condiciones de flujo para la velocidad superficial de la fase líquida, y para cada una de ellas se estudiaron al menos 4 condiciones distintas de velocidad superficial de fase gaseosa que en combinación con la fase líquida representan una variación de la fracción de huecos en promedio de 0 a 25 %.

La tabla 5.5 muestra en resumen las condiciones de flujo del ensayo F. Las velocidades de fase líquida son muy similares en los ensayos F0X y F0XA, el número de Reynolds sobrepasa en todos los casos el valor de 20,000 propio de flujo turbulento. La velocidad de fase gaseosa en ambos ensayos es también muy semejante. En adelante interpretaremos que las velocidades superficiales de fase líquida y gas son las mismas para ambos experimentos con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en el empleo de dos geometrías distintas de la sonda de conductividad.

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales

5.4 Condiciones de flujo iniciales ensayo F

$j_f [m/s] = 0.51$		$Re_f = 22836$		$j_f [m/s] = 0.506$		$Re_f = 24886$	
Condición	$j_g [m/s]$	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$	Re_g	Condición	$j_g [m/s]$	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$	Re_g
F01G00	0	0	0	F01AG00	0	0	0
F01G01	0.035	5.14	160	F01AG01	0.035	5.36	158
F01G02	0.077	10.03	353	F01AG02	0.077	10.27	347
F01G03	0.125	15.11	564	F01AG03	0.125	15.51	559
F01G04	0.176	19.95	786	F01AG04	0.174	19.92	766
F01G05	0.257	21.7	1141	F01AG05	0.256	21.39	1121
F01G06	0.338	24.38	1505	F01AG06	0.406	27.4	1757
$j_f [m/s] = 1.023$		$Re_f = 44140$		$j_f [m/s] = 1.027$		$Re_f = 51599$	
Condición	$j_g [m/s]$	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$	Re_g	Condición	$j_g [m/s]$	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$	Re_g
F02G00	0	0	0	F02AG00	0	0	0
F02G01	0.058	4.99	272	F02AG01	0.059	5.14	272
F02G02	0.142	10.3	656	F02AG02	0.141	10.2	641
F02G03	0.235	14.32	1081	F02AG03	0.235	14.78	1056
F02G04	0.396	18.57	1814	F02AG04	0.361	19.42	1606
F02G05	0.67	23.96	3044	F02AG05	0.676	25.05	2962
$j_f [m/s] = 2.036$		$Re_f = 97188$		$j_f [m/s] = 2.026$		$Re_f = 105129$	
Condición	$j_g [m/s]$	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$	Re_g	Condición	$j_g [m/s]$	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$	Re_g
F03G00	0	0	0	F03AG00	0	0	0
F03G01	0.097	4.5	458	F03AG01	0.098	3.5	453
F03G02	0.233	9.73	1095	F03AG02	0.228	8.52	1057
F03G03	0.47	12.39	2198	F03AG03	0.474	12.76	2189
F03G04	0.72	19.66	3343	F03AG04	0.727	18.89	3325
F03G05	1.181	21.8	5403	F03AG05	1.202	21.49	5403
$j_f [m/s] = 3.086$		$Re_f = 191078$		$j_f [m/s] = 3.033$		$Re_f = 166915$	
Condición	$j_g [m/s]$	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$	Re_g	Condición	$j_g [m/s]$	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$	Re_g
F04G00	0	0	0	F04AG00	0	0	0
F04G01	0.166	3.12	777	F04AG01	0.166	2.13	778
F04G02	0.389	4.72	1834	F04AG02	0.396	4.7	1866
F04G03	0.662	7.56	3168	F04AG03	0.668	7.17	3142
F04G04	1.023	9.03	4874	F04AG04	1.037	9.83	4839
F04G05	1.695	9.51	8018	F04AG05	1.738	9.76	8034

5.4 Condiciones de flujo iniciales ensayos F (continuación)

$j_f [m/s] = 4.074$		$Re_f = 282713$		$j_f [m/s] = 4.087$		$Re_f = 320137$	
Condición	$j_g [m/s]$	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$	Re_g	Condición	$j_g [m/s]$	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$	Re_g
F05G00	0	0	0	F05AG00	0	0	0
F05G01	0.265	2.97	1308	F05AG01	0.27	3.05	1323
F05G02	0.796	4.52	3991	F05AG02	0.79	4.19	3958
F05G03	0.792	5.14	3898	F05AG03	1.331	4.44	6686
F05G04	1.315	4.66	6571	F05AG04	2.18	3.84	10930

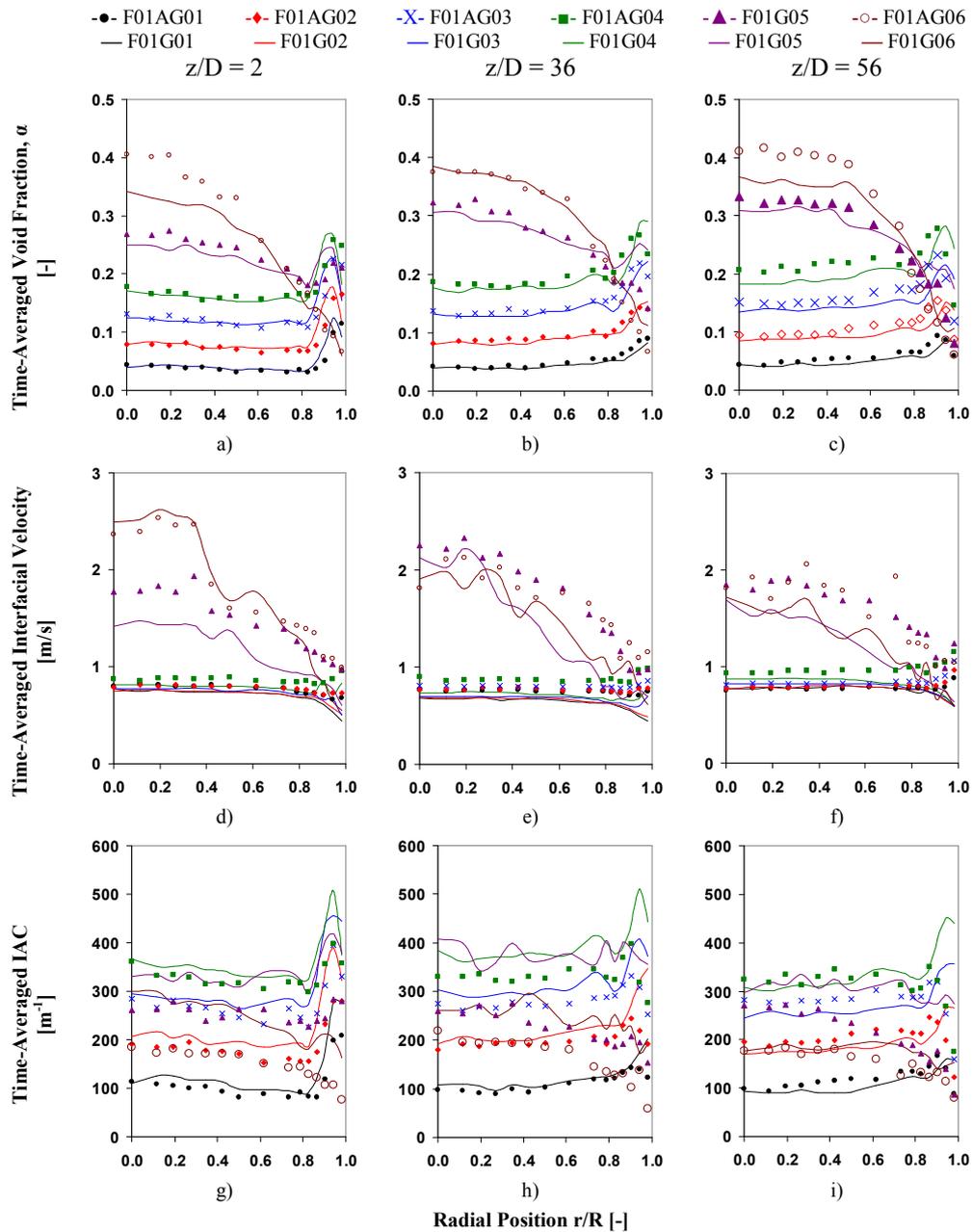
5.2.3 Resultados

La tabla 5.5 muestra los valores de la fracción de huecos determinada con la sonda de conductividad en la posición axial $z/D = 56$. La siguientes graficas, muestran los resultados obtenidos en la medida de los parámetros locales de flujo bifásico mediante el empleo de sondas de conductividad en tres posiciones axiales. En el siguiente capítulo se efectuar el análisis de los resultados más representativos obtenidos en estos ensayos.

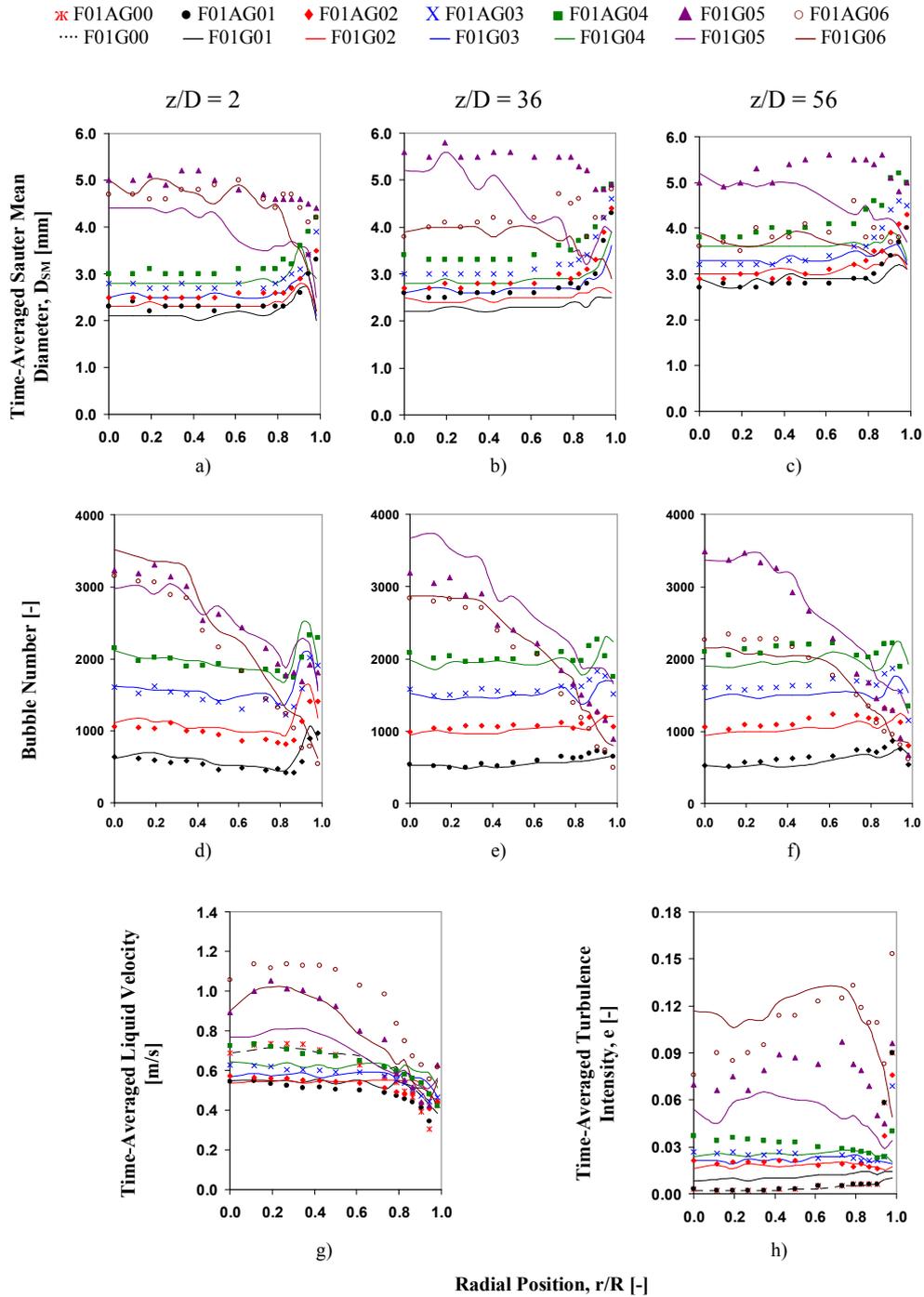
5.5 Fracciones de huecos ensayos F

	F01	F01A	F02	F02A	F03	F03A	F04	F04A	F05	F05A
G01	5.6	6.3	4.8	6.1	3.7	5.3	5.0	5.1	4.9	4.8
G02	10.4	11.5	9.4	11.9	8.2	10.1	9.7	9.8	11.2	10.8
G03	15.8	17.1	14.	17.6	14.9	17.4	14.7	13.0	11.7	15.7
G04	21.1	22.5	22.3	24.1	20.1	22.4	19.5	17.6	13.9	21.3
G05	25.9	25.2	29.9	30.6	26.2	26.3	24.1	23.0	19.6	0
G06	26.9	27.8	0	0	0	0	0	0	0	0

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales

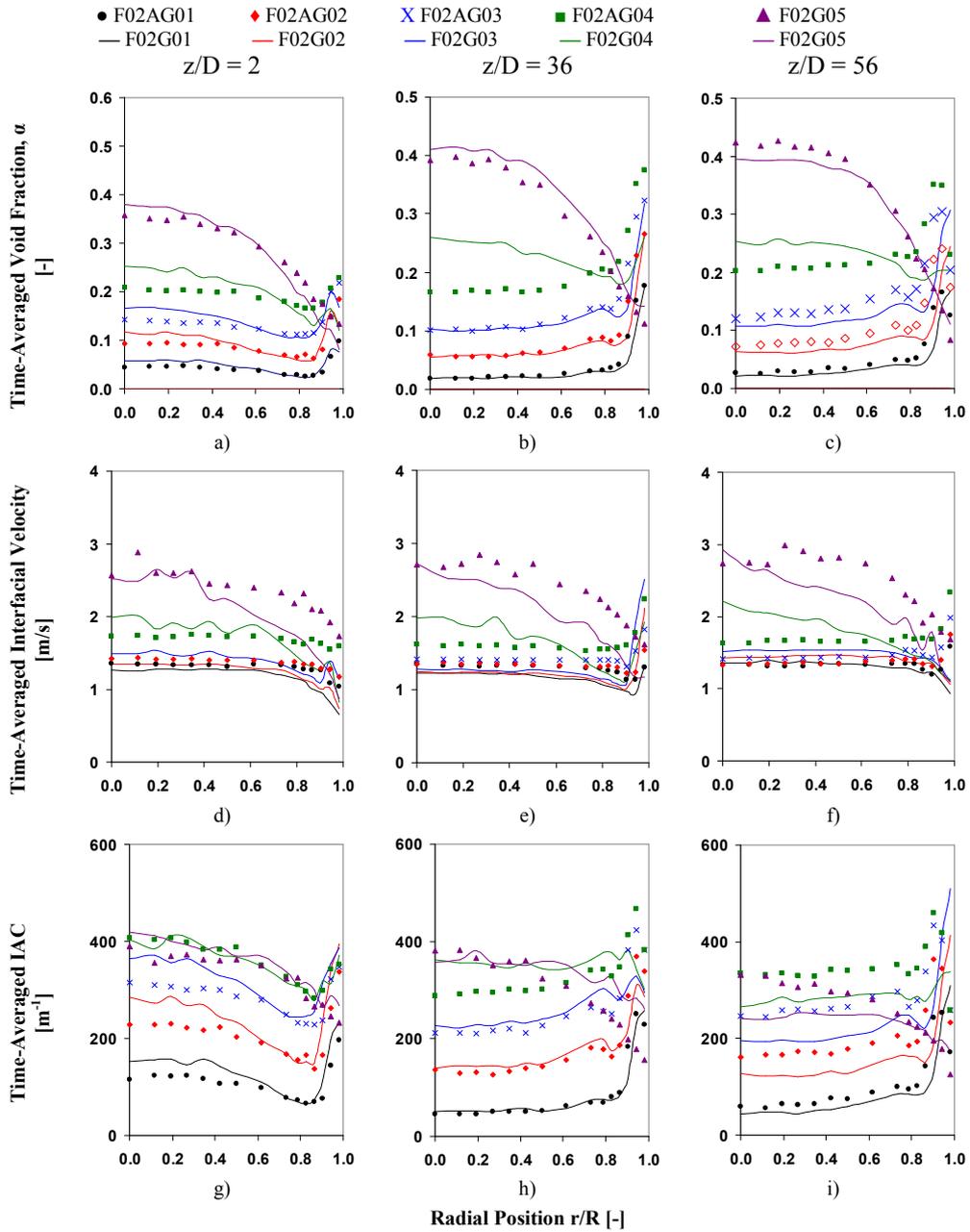


Gráfica 5.5 Ensayo F para $j_f = 0.5$ m/s

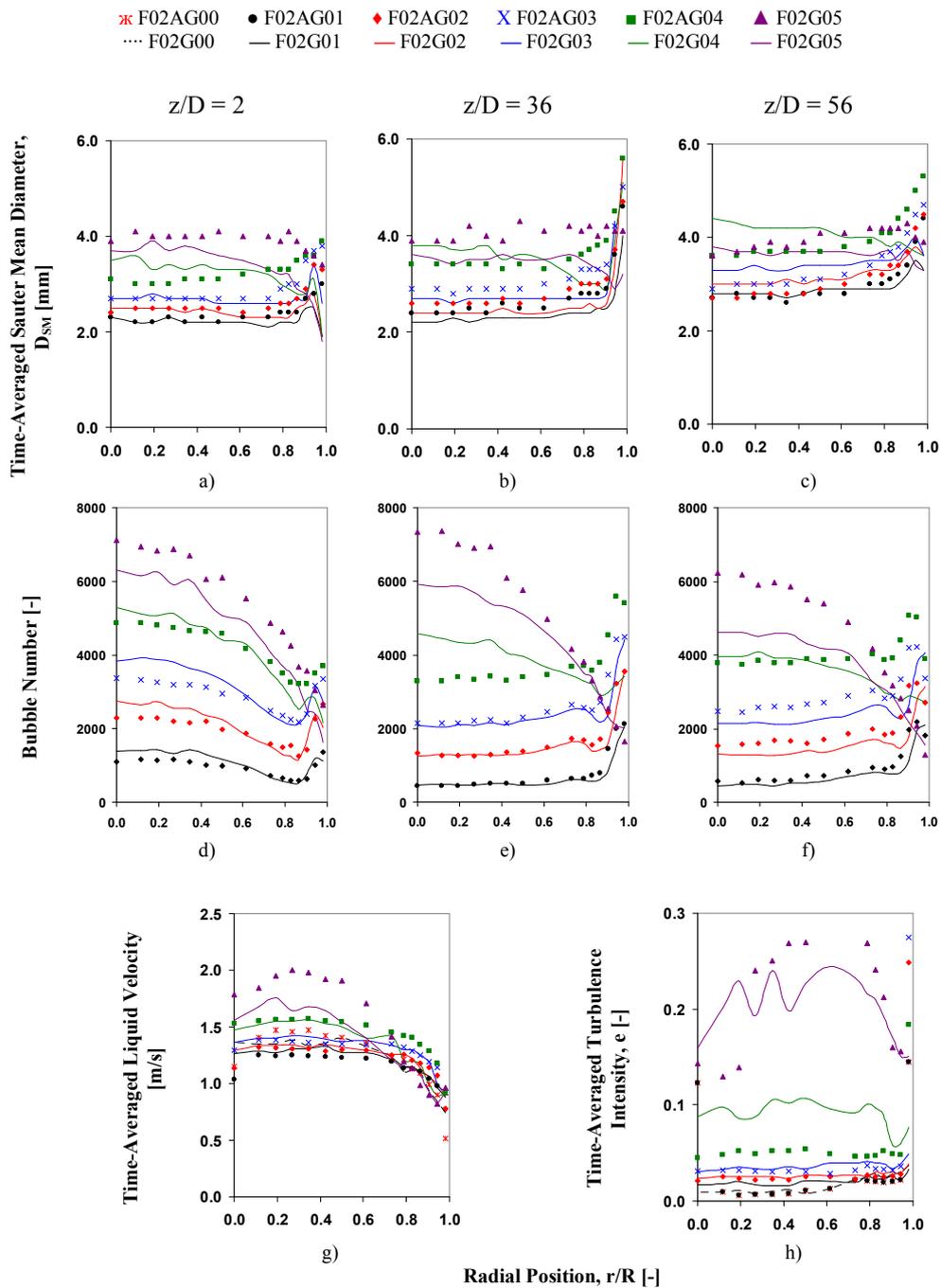


Gráfica 5.6 Ensayo F para $j_l = 0.5$ m/s

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales

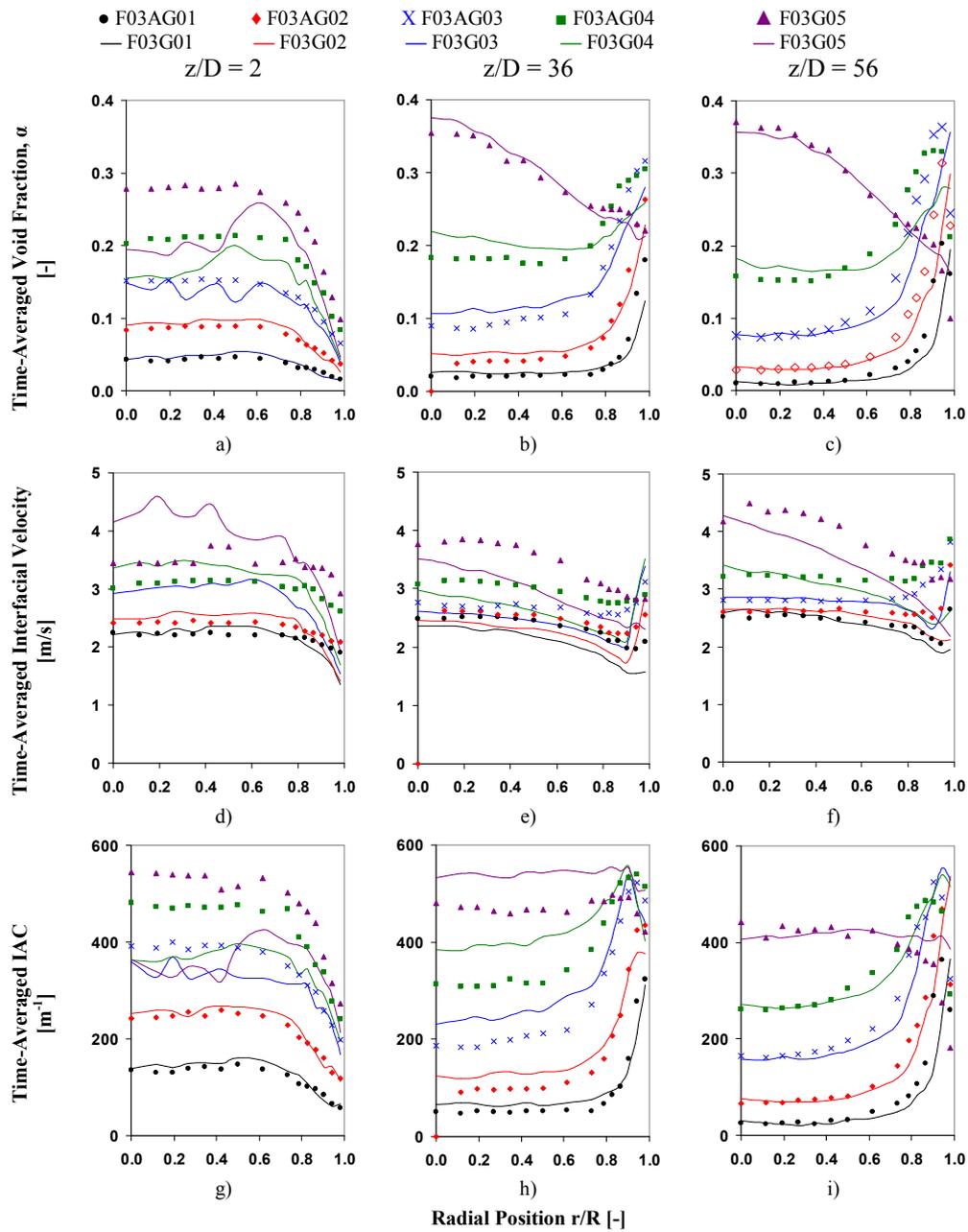


Gráfica 5.7 Ensayo F para $j_f = 1.0$ m/s

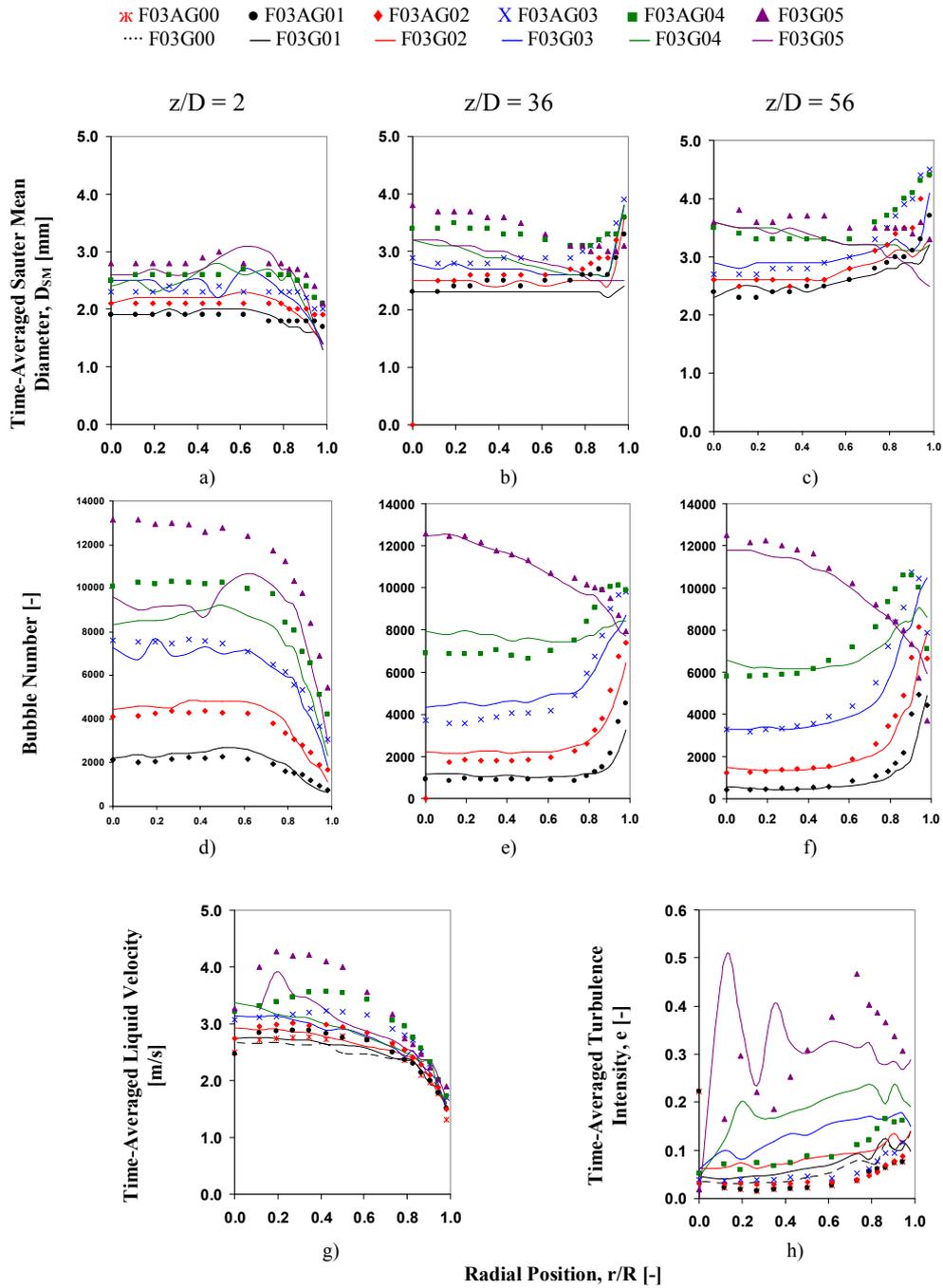


Gráfica 5.8 Ensayo F para $j_l = 1.0$ m/s

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales

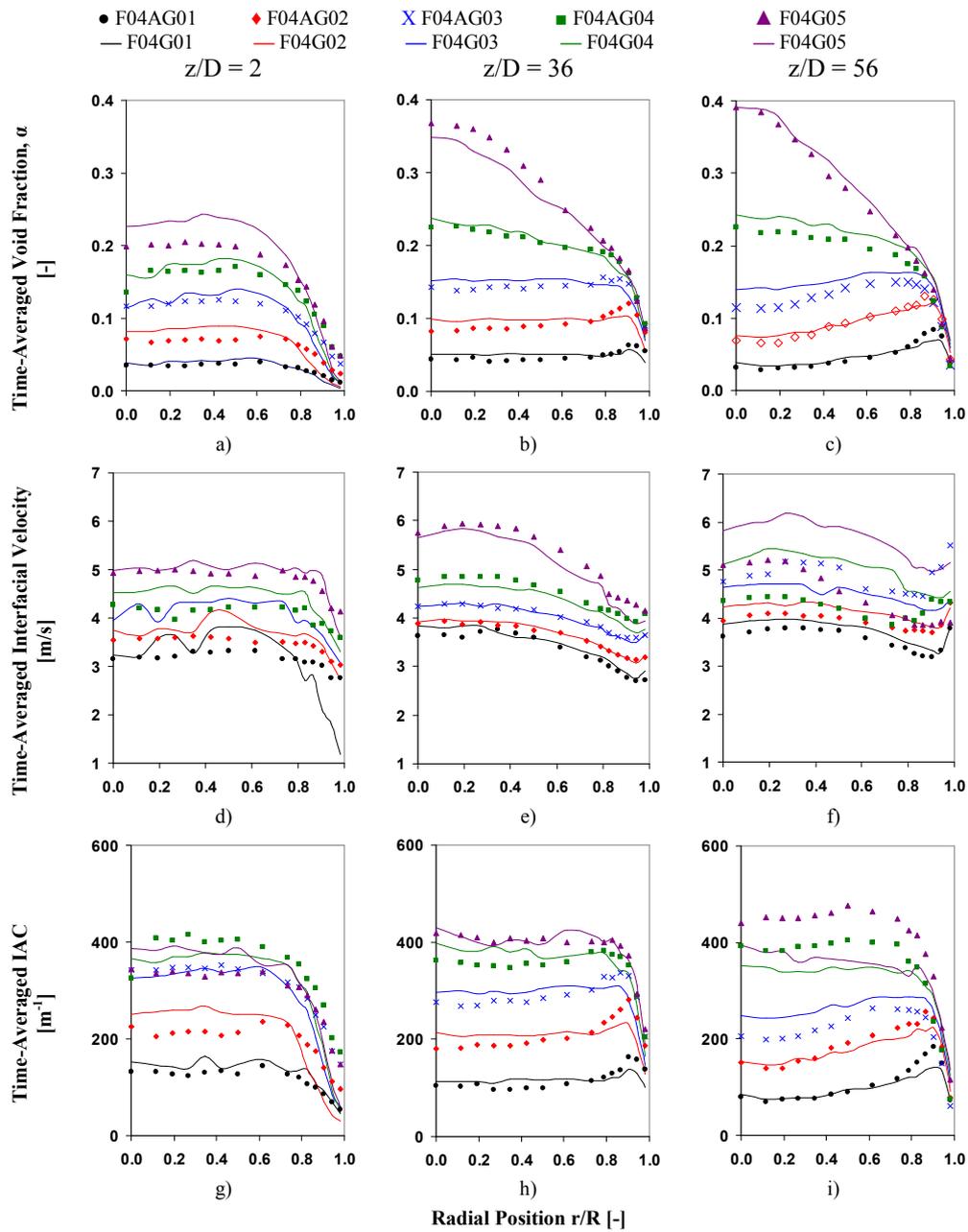


Gráfica 5.9 Ensayo F para $j_f = 2.0$ m/s

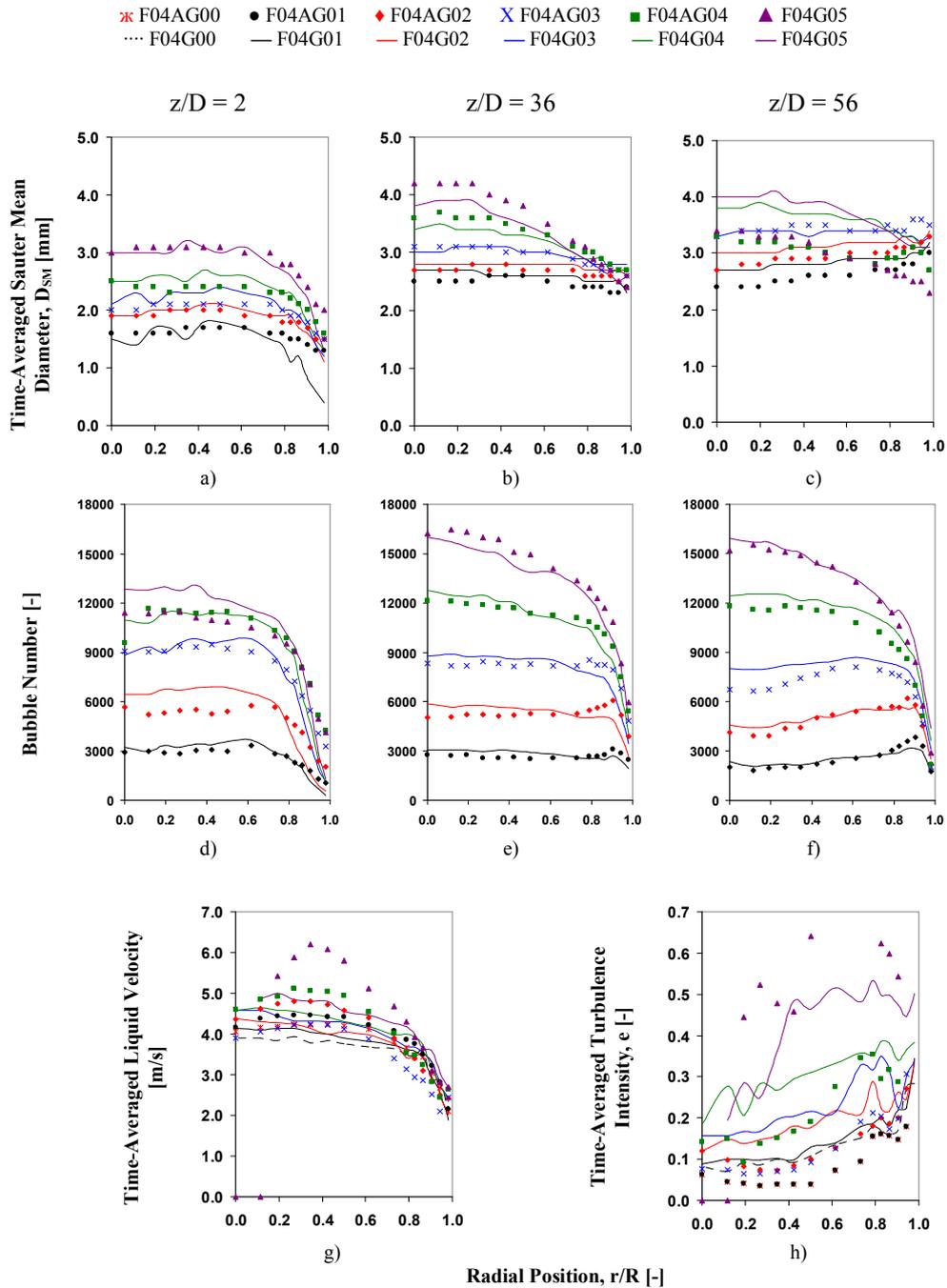


Gráfica 5.10 Ensayo F para $j_1 = 2.0$ m/s

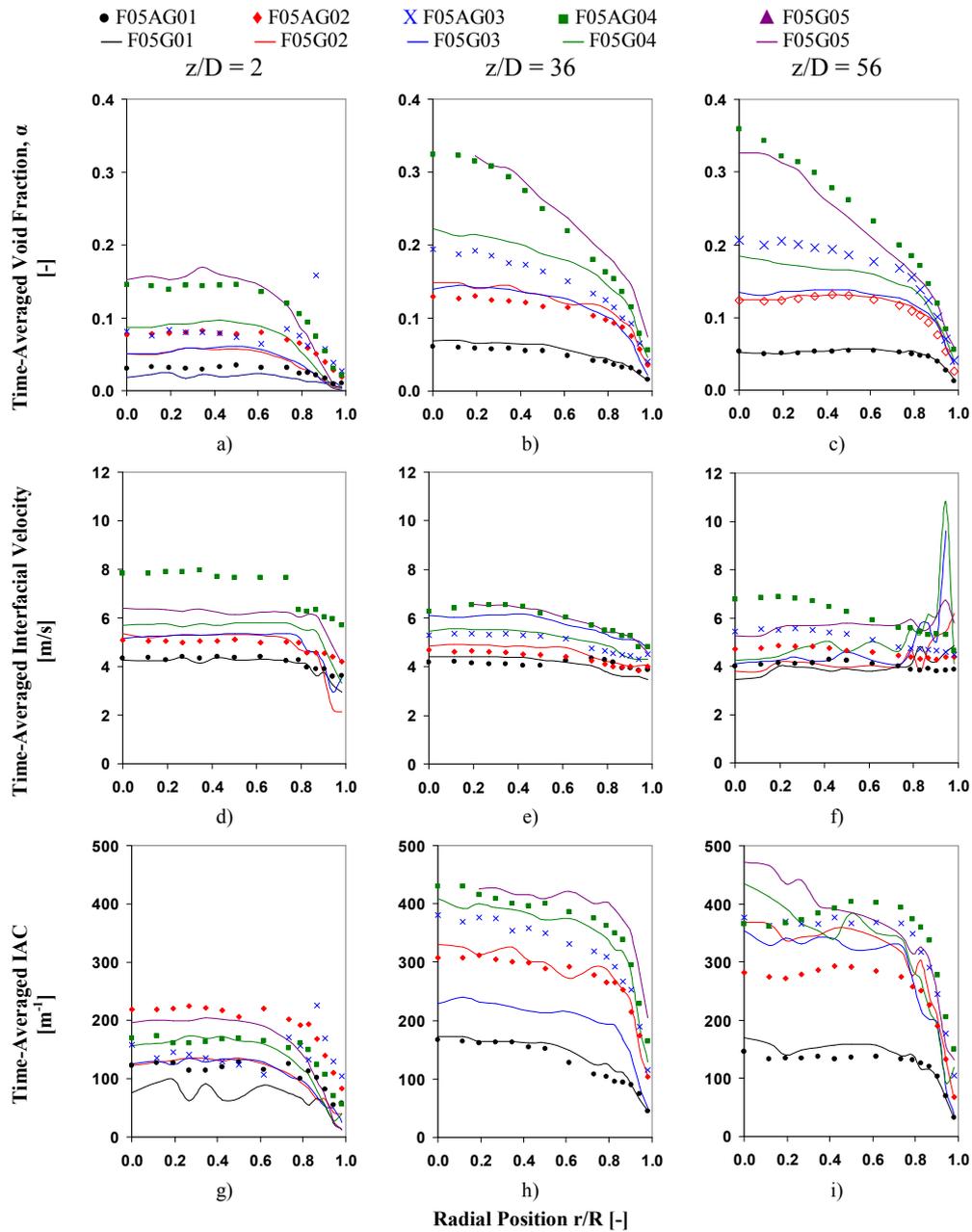
Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales



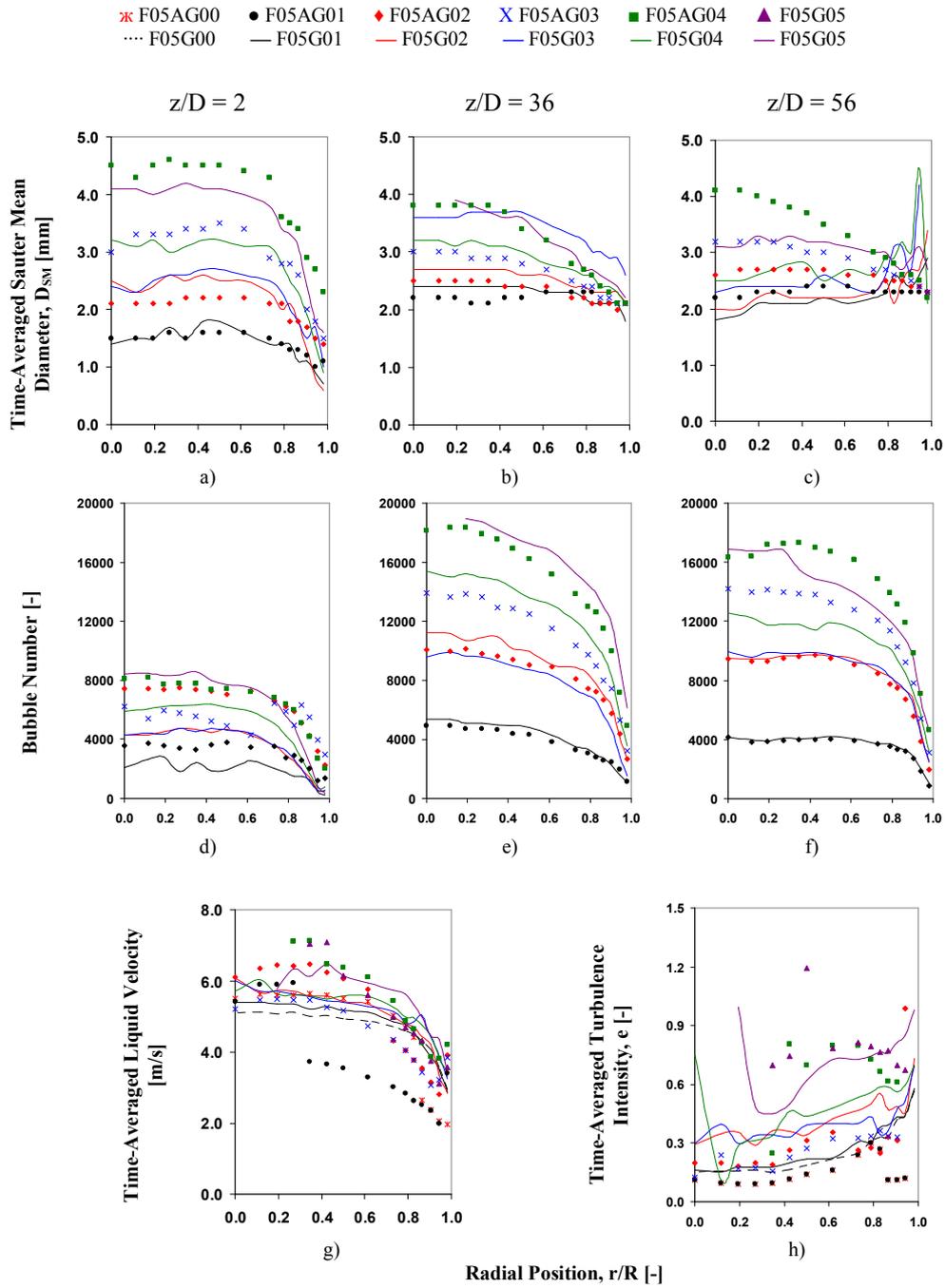
Gráfica 5.11 Ensayo F para $j_f = 3.0$ m/s



Gráfica 5.12 Ensayo F para $j_1 = 3.0$ m/s



Gráfica 5.13 Ensayo F para $j_f = 4.0$ m/s



Gráfica 5.14 Ensayo F para $j_1 = 4.0$ m/s

5.3 Ensayos B-E

5.3.1 Objetivos

El objetivo que persigue este conjunto de ensayos es medir el efecto que tiene sobre los parámetros locales de flujo bifásico el cambio de la tensión superficial de la fase líquida y la respuesta que proporciona la sonda de conductividad, especialmente ante la reducción del tamaño de burbuja. Para ello se establecieron condiciones de flujo que incluyen velocidades superficiales de la fase líquida aproximadamente de 0.5, 1.0 y 2.0 m/s y velocidades superficiales de la fase gaseosa que propicien fracciones de huecos volumétricas de 0 a 25%.

4.3.2 Configuración del experimento

La fase líquida empleada en este ensayo fue agua potable de la red descalcificada y filtrada a la que se agregó con el objetivo de provocar una disminución en la tensión superficial de la fase líquida, pequeñas cantidades de 1-Butanol [$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OH}$] que es un alcohol derivado del butano. El volumen de agua sobre el que efectuaron estos ensayos fue de 350 litros de agua. La medida de la tensión superficial se realizó en el Centro de Biomateriales de la Universidad Politécnica de Valencia mediante el empleo de un equipo OCA 20 de Dataphysics empleando el método de la gota colgante en grupos de 5 mediciones. La tabla 5.6 muestra el cambio de la tensión superficial obtenida con la adición del aditivo descrito en partes por millón, también se indica como serán llamados los distintos ensayos realizados y la concentración del aditivo añadido.

5.6 Propiedades de la fase líquida

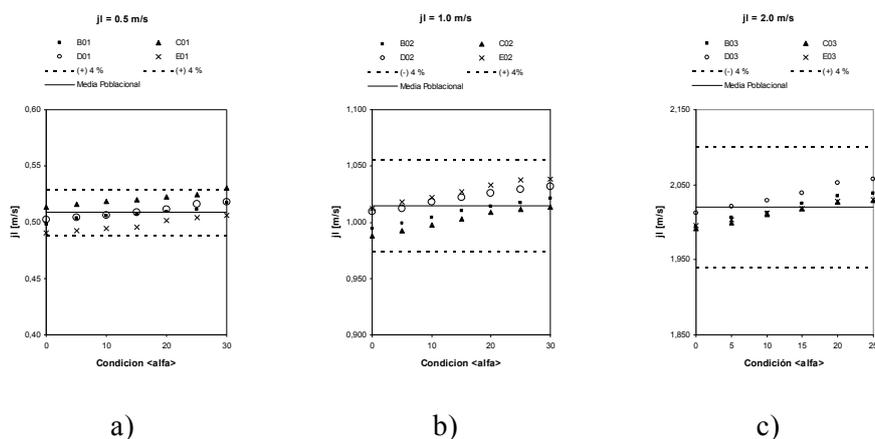
Ensayo	Concentración [ppm]	Tensión superficial [N/m]
B	0	72,2 +/- 0,8
C	9	66,3 +/- 0,7
D	39	65,7 +/- 0,9
E	75	66,6 +/- 0,9

Las mediciones de los principales parámetros de flujo bifásico con la sonda de conductividad fueron realizadas en 15 posiciones radiales que van de $r/R = 0.02$ a $r/R = 1.0$ y en tres posiciones axiales ($z/D = 2, 36, 56$) mientras que la geometría de la sonda empleada es la F0XA tal como fue descrito en la sección 5.2.2. El sistema LDA fue instalado en una única posición axial ($z/D=50$).

Los ensayos se efectuaron a temperatura ambiente y presión atmosférica a la descarga de la mezcla bifásica en el separador de fases.

a) Condiciones de flujo

La velocidad superficial media de la fase líquida se estableció en 3 condiciones distintas (0.5, 1.0, y 2.0 m/s) en todos los casos. Las velocidades superficiales de la fase líquida para cada ensayo (B, C, D y E) se establecieron en los mismos valores, es decir que la velocidad superficial del líquido en el ensayo B y en la condición G00 (ausencia de aire) es prácticamente la misma para los demás ensayos (C, D y E) durante su ejecución. La figura 5.7 muestra los valores de j_f para estos ensayos, se observa que los valores de velocidad de fase líquida se encuentran dentro del 5% de error respecto a valor medio de la velocidad superficial de fase líquida para el ensayo B. Podemos asumir que la velocidad superficial de la fase líquida en el ensayo B es la misma para los demás ensayos.



Gráfica 5.15 Velocidades superficiales de la fase

La tabla 5.7 muestra las condiciones de la fase líquida a la entrada de la sección de medida para cada ensayo, se observa que el error es muy bajo y no supera el 2.0% respecto al valor del promedio. En vista de este análisis en lo sucesivo se mencionará como condiciones de flujo para todos estos ensayos a las condiciones establecidas para el ensayo B.

5.7 Condiciones de velocidad superficial de fase líquida

Ensayo B-E	Velocidad superficial de líquido j_l [m/s]			
$j_l = 0.5m/s$	B01	C01	D01	E01
G00	0.499	0.514	0.502	0.491
Promedio	0.508	0.521	0.510	0.498
Error [%]	1.787	1.366	1.456	1.470
$j_l = 1.0m/s$	B02	C02	D02	E02
G00	0.994	0.988	1.009	1.012
Promedio	1.009	1.002	1.021	1.027
Error [%]	1.441	1.440	1.171	1.435
$j_l = 2.0m/s$	B03	C03	D03	E03
G00	1.995	1.992	2.012	1.995
Promedio	2.019	2.013	2.035	2.015
Error [%]	1.191	1.034	1.131	0.951

La velocidad superficial de la fase gaseosa se establece siguiendo el mismo procedimiento que en el ensayos F: se incrementa el caudal de gas hasta lograr una reducción de la presión en un punto conocido equivalente a una fracción de huecos deseada (sección 4.3), sin embargo esto solo se efectúa en el ensayo B y una vez procesada la información se repitieron las condiciones de velocidad superficial de fase gaseosa para el resto de los ensayos.

La tabla 5.8 muestra los valores de la presión medidas en tres diferentes posiciones axiales ($z/D = 2, 36$ y 56). Se observa que el porcentaje de reducción de la presión debida a la presencia de aire con velocidad de la fase gaseosa j_g son muy parecidos a la condición de fracción de huecos deseada, sólo se muestran datos son los obtenidos durante la ejecución del ensayo B. Se observa que en general se buscan fracciones de huecos cercanas a los valores de 5, 10, 15 20 y 25 %.

5.8 Reducción de presión, ensayos B

Condición	j_l [m/s]	j_g [m/s]	PCA [mBar]	Reducción [%]
B01G00	3,763	0,000	53,53	0,00
B01G01	1,013	0,035	50,66	5,37
B01G02	1,447	0,080	47,92	10,47
B01G03	1,737	0,129	45,12	15,70
B01G04	2,171	0,188	42,73	20,18
B01G05	2,605	0,267	41,98	21,57
B01G06	3,763	0,504	37,28	30,36
B02G00	2,758	0,000	53,17	0,00
B02G01	0,508	0,075	49,57	6,77
B02G02	1,016	0,167	46,74	12,09
B02G03	1,597	0,271	44,48	16,35
B02G04	2,032	0,378	42,90	19,31
B02G05	2,322	0,492	41,95	21,10
B02G06	2,758	0,622	40,51	23,81
B03G00	2,206	0,000	51,19	0,00
B03G01	0,579	0,134	48,49	5,27
B03G02	0,904	0,348	46,99	8,20
B03G03	1,519	0,636	42,45	17,07
B03G04	2,025	1,270	40,04	21,77
B03G05	2,206	2,390	38,68	24,43

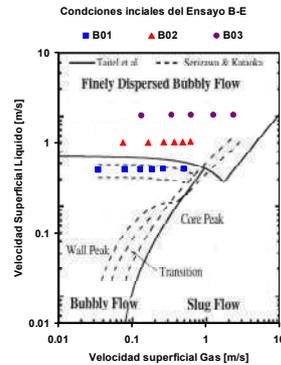
La tabla 5.9 muestra las condiciones de flujo para el ensayo B-E. Se muestran las velocidades superficiales de la fase líquida y gaseosa, las fracciones de hueco referidas al cambio de presión en la posición axial $z/D=56$ y el número de Reynolds para ambas fases solo para el ensayo B.

Las propiedades físicas densidad y viscosidad para el cálculo del número de Reynolds indicado fueron calculadas en función de la presión y temperatura, dichos cálculos fueron realizados con el programa REPROF del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) en los Estados Unidos de América.

5.9 Condiciones de flujo para el ensayo B

$j_f = 0.498 m/s$		
Condición	j_g [m/s]	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$
B01G00	0	0
B01G01	0,035	5,37
B01G02	0,080	10,47
B01G03	0,129	15,70
B01G04	0,188	20,18
B01G05	0,266	21,57
B01G06	0,503	30,36
$j_f = 0.994 m/s$		
Condición	j_g [m/s]	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$
B02G00	0	0
B02G01	0,075	6,77
B02G02	0,166	12,09
B02G03	0,271	16,35
B02G04	0,377	19,31
B02G05	0,492	21,10
B02G06	0,621	23,81
$j_f = 1.994 m/s$		
Condición	j_g [m/s]	$\langle \alpha \rangle_{z/d = SUP}$
B03G00	0	0
B03G01	0,134	5,27
B03G02	0,347	8,20
B03G03	0,635	17,07
B03G04	1,270	21,77
F03G05	2,390	24,43

La gráfica 5.16 muestra, en un mapa de flujo, las velocidades superficiales del ensayo B que son las mismas para los ensayos C, D y E. Las condiciones se encuentran en la región de flujo bubbly o burbujas finamente dispersas.



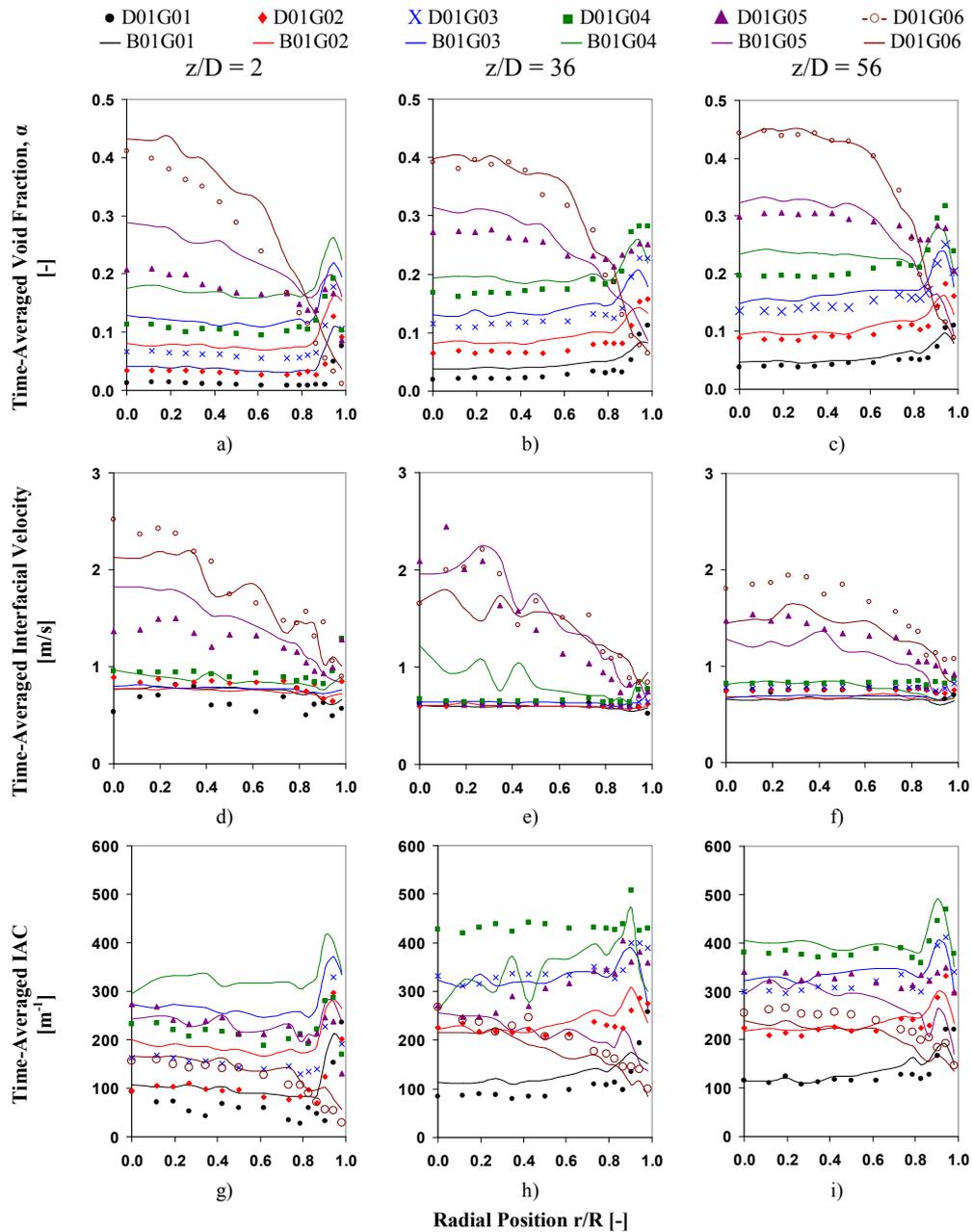
Gráfica 5.16 Mapa de flujo, ensayo B

5.3.3 Resultados

A continuación son presentados los resultados experimentales obtenidos en esta familia de ensayos. Sólo son mostrados los resultados obtenidos en los ensayos B y D, en el Anexo encontrado al final de la tesis son mostrados los resultados de los ensayos restantes. Esto se ha realizado así debido a la excesiva cantidad de información haciendo complicada su valoración. Se ha decidido presentar comparativamente los resultados de los ensayos B y D debido a que reflejan los efectos del cambio de la tensión superficial de la fase líquida y con ello de la estructura de flujo.

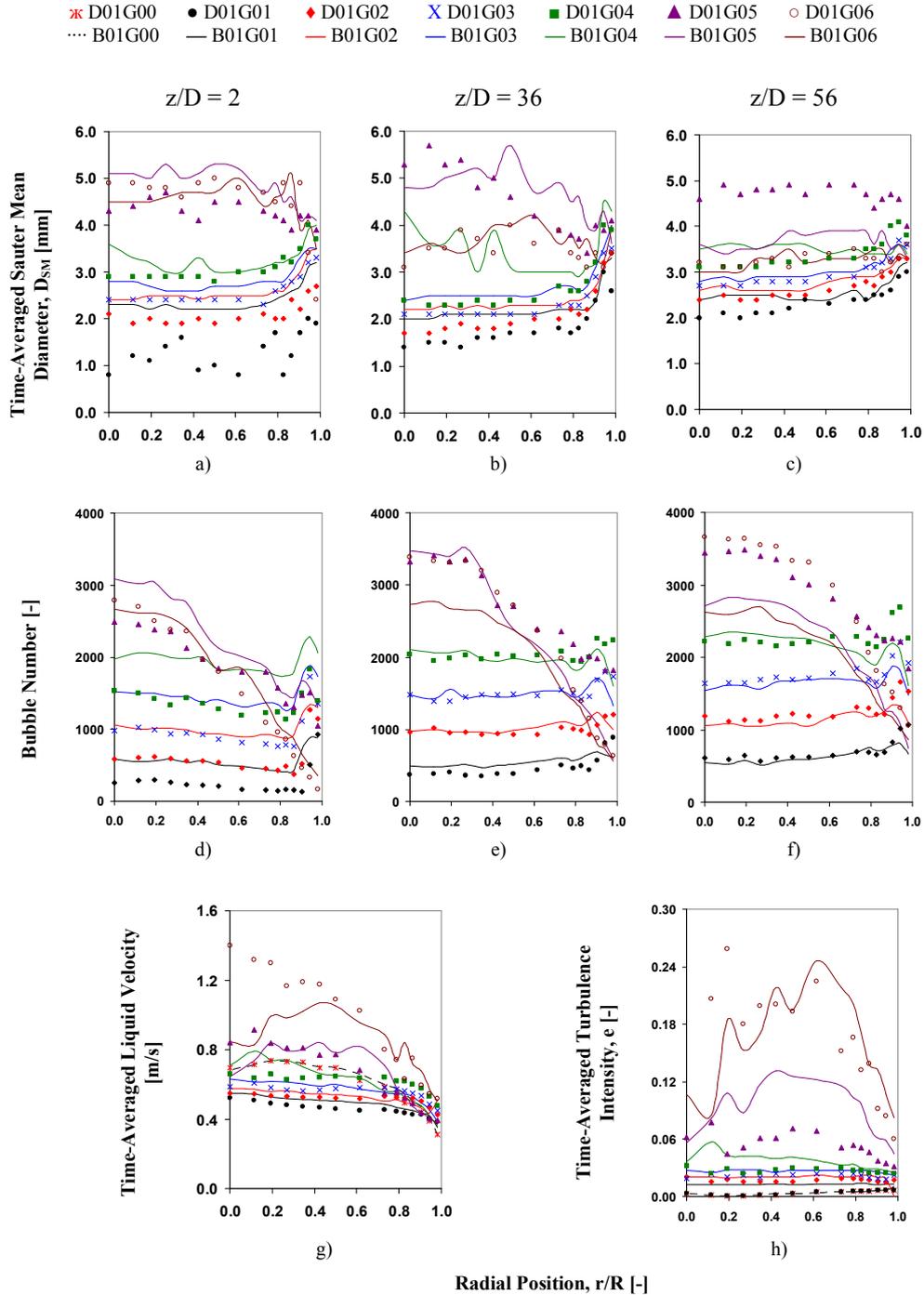
Las imágenes obtenidas mediante el sistema de visión artificial son analizadas en conjunto con los perfiles radiales de los parámetros de flujo para una mayor comprensión de los fenómenos que ocurren en el flujo bifásico bajo esta configuración. La información aportada por las imágenes digitales es solamente valorada cualitativamente, como parte de un trabajo futuro debe incluirse un profundo análisis de imagen digital.

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales



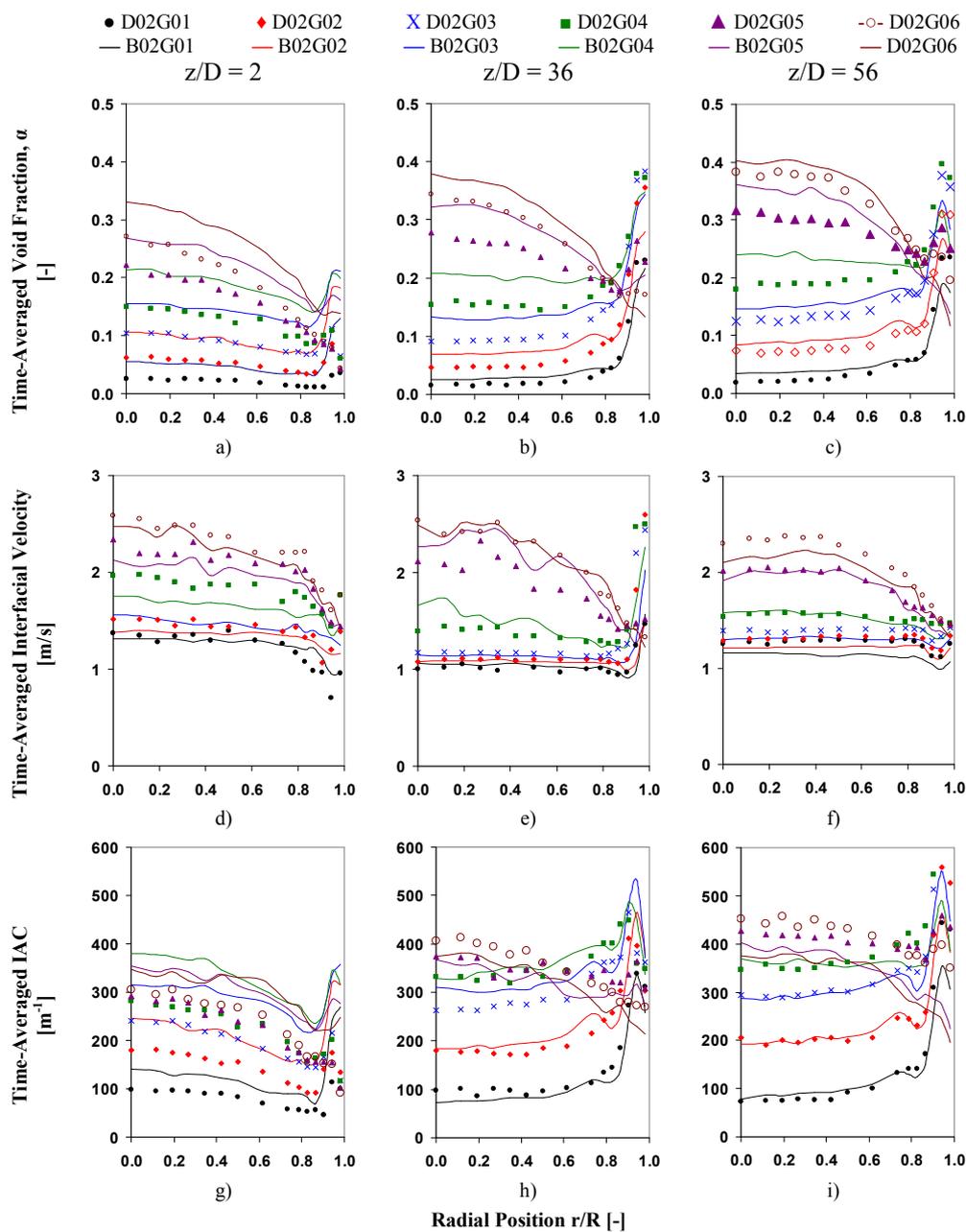
Gráfica 5.17 Ensayo B y D para $j_f = 0.5$ m/s

5.3 Ensayos B-E

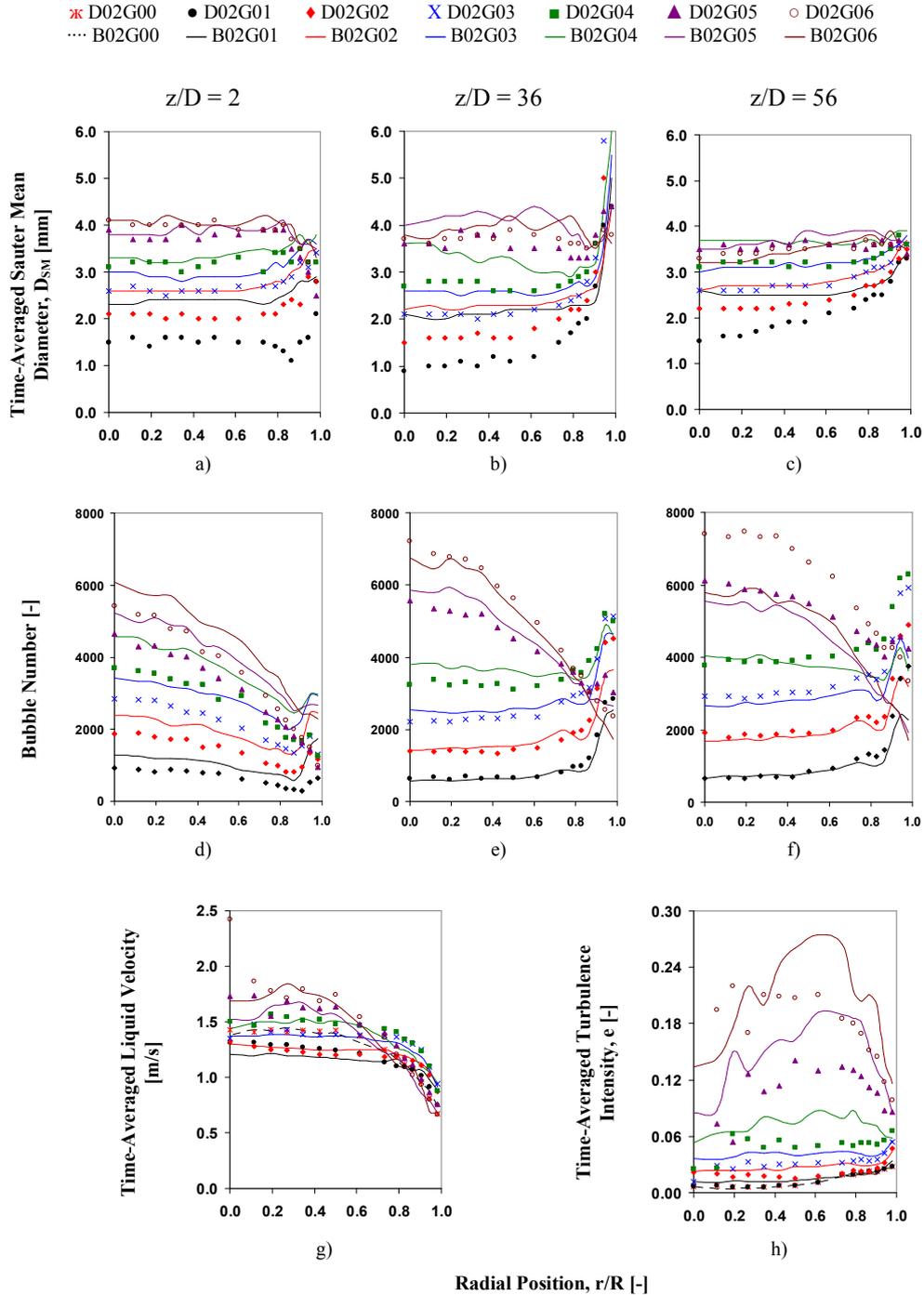


Gráfica 5.18 Ensayo B y D para $j_1 = 0.5$ m/s

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales

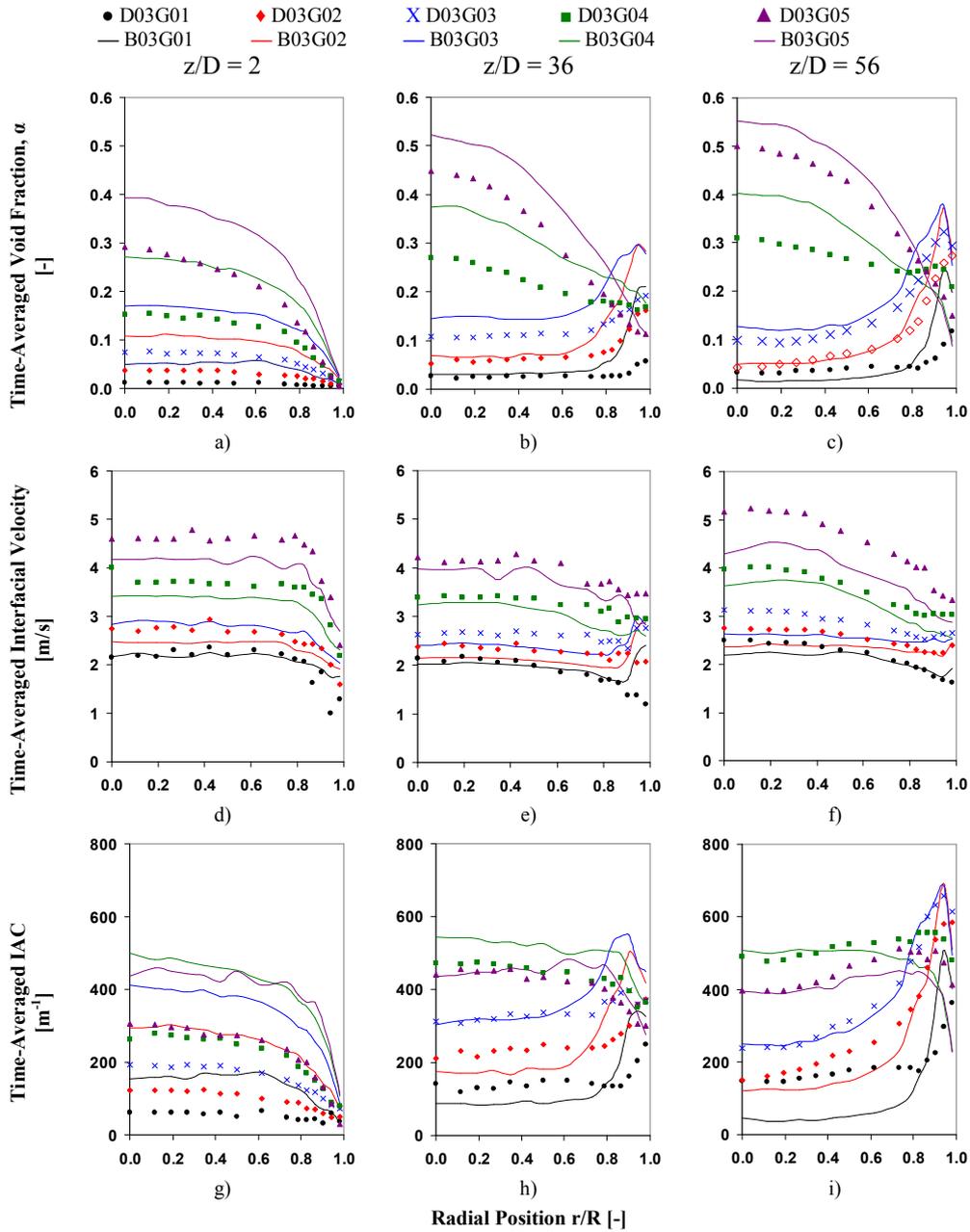


Gráfica 5.19 Ensayo B y D para $j_f = 1.0$ m/s

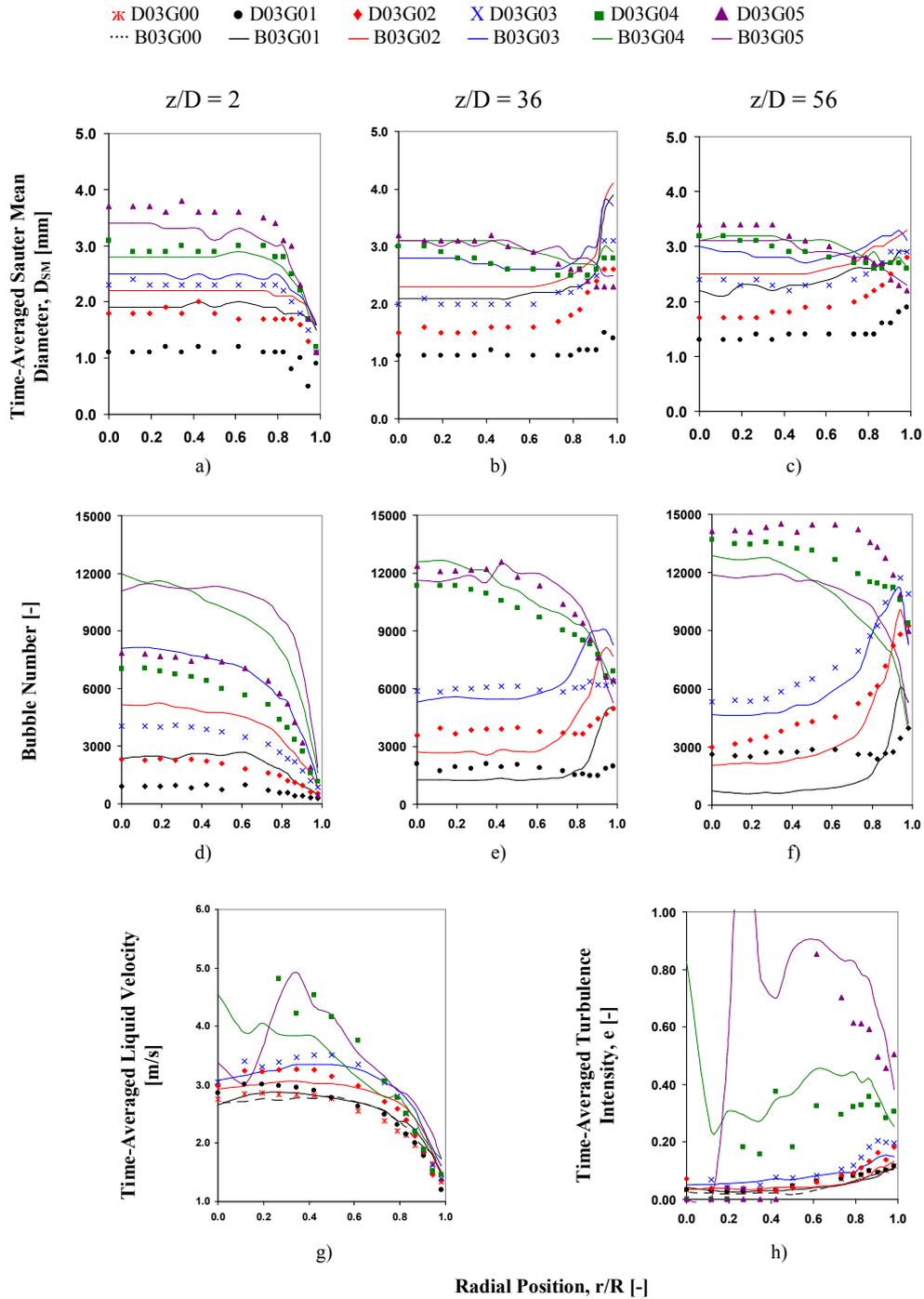


Gráfica 5.20 Ensayo B y D para $j_1 = 1.0$ m/s

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales



Gráfica 5.21 Ensayo B y D para $j_f = 2.0$ m/s



Gráfica 5.22 Ensayo B y D para $j_1 = 2.0$ m/s

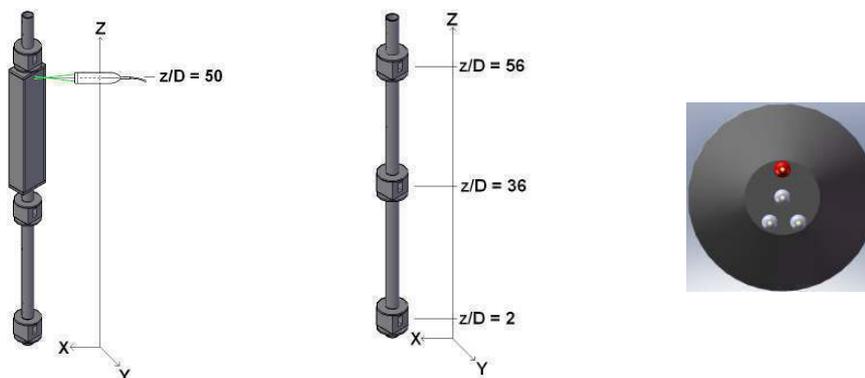
5.4 Ensayos A

5.4.1 Objetivos

El objetivo que persigue este grupo de ensayos es efectuar mediciones de los parámetros locales de flujo bifásico en condiciones de flujo muy próximas entre sí de manera que sea posible cubrir el inicio de la transición del régimen de flujo bubbly a slug, esto se ha logrado incrementando gradualmente la cantidad volumétrica de aire inyectado a la cámara de mezclado para cubrir fracciones de huecos que abarquen el aproximadamente el intervalo 0 - 30%, con incrementos de 2.5% asegurando cubrir el inicio de la transición del régimen de flujo.

En muchas ocasiones las limitaciones técnicas de la instalación como la precisión de los medidores de presión y el medidor de caudal volumétrico de aire impidieron obtener a las condiciones deseadas con exactitud, no obstante debido al incremento gradual de la cantidad de aire es posible extraer información valiosa en cuanto al inicio de la transición de un régimen a otro. Un segundo objetivo fue estudiar las características del flujo bifásico en posiciones cercanas a la pared, las sondas de conductividad instaladas en los puertos fueron posicionadas muy cerca de la pared y un avance pequeño.

5.4.2 Configuración del experimento



a) Posición axial de LDA b) Posición axial de sondas c) Configuración F0XA

Figura 5.4 Configuración de LDA y sonda en Ensayo A

Las posiciones axiales en las que se instaló el sistema LDA y las sondas de conductividad, así como la configuración geométrica de la sonda son las mismas que se emplearon en los ensayos B-E y se muestran en la figura 5.6.

La tabla 5.10 muestra las posiciones radiales en las cuales se efectuó el posicionamiento de la sonda. Existe un mayor empleo de la sonda de conductividad en la proximidad a la pared como se puede observar, el objetivo de esta alta densidad de posiciones es detectar la evolución del pico de pared.

Nuevamente la fase líquida empleada en este ensayo fue agua potable de la red descalcificada y filtrada, se efectuaron estos ensayos a temperatura ambiente y presión atmosférica a la descarga de la sección de medida. La sonda de conductividad fue empleada en 21 posiciones radiales que van de $r/R = 0.02$ a $r/R = 1.0$ y en tres posiciones axiales diferentes: $z/D = 2, 36, 56$.

5.10 Posiciones radiales

ID	Pared [mm]	r/R []
r01	0,5	0,02
r02	0,85	0,03
r03	1,15	0,04
r04	1,5	0,06
r05	1,85	0,07
r06	2,15	0,08
r07	2,5	0,10
r08	3	0,12
r09	3,5	0,13
r10	4	0,15
r11	4,5	0,17
r12	5,5	0,21
r13	7	0,27
r14	10	0,38
r15	13	0,50
r16	15	0,58
r17	17	0,65
r18	19	0,73
r19	21	0,81
r20	23	0,88
r21	26	1,00

a) Condiciones de flujo

La velocidad superficial media de la fase líquida se fijó en 4 condiciones distintas, no se realizaron ensayos a mayores velocidades debido a que es necesario el uso del sistema de bombeo más potente y que genera un aumento en la temperatura de la fase líquida que puede generar efectos nocivos en la instalación si supera los 30°C, además si la temperatura del líquido cambia considerablemente durante la realización de la prueba, podría ya no ser válida la suposición de flujo adiabático.

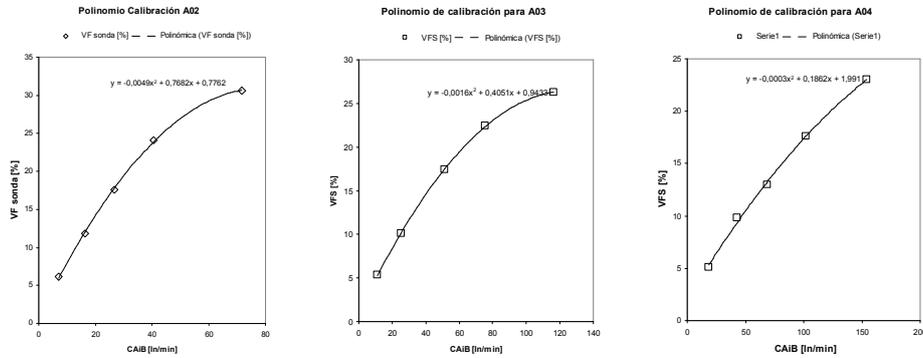
Para establecer la condición de velocidad superficial de la fase gaseosa se realizaron ensayos de calibración, en los cuales se empleó el método usado para fijar las condiciones del ensayo F. La información obtenida fue empleada para obtener un polinomio que relaciona el caudal volumétrico de la fase gaseosa con la fracción de huecos obtenida con la sonda, dicho polinomio fue calculado asumiendo que la fracción de huecos para una velocidad superficial de la fase líquida depende solamente de la cantidad de aire que se inyecta en la cámara de mezcla dado que la velocidad de fase líquida es constante. Esto se logró ensayando condiciones similares al ensayo FOXA para cada condición de velocidad superficial de líquido, posteriormente se estableció un *polinomio de calibración* que relaciona el caudal volumétrico de la fase gaseosa con la fracción de huecos obtenida con la sonda. A partir de este polinomio se establecieron incrementos de 2.5% en la fracción de huecos deseada y se determinó el caudal de aire necesario para tal condición. Esto se realizó para lograr una mayor precisión en el establecimiento de las condiciones de flujo, y poder ejecutarlas de forma automática.

5.11 Punto de calibración para A02, $j_l = 1.0\text{m/s}$

CAiB [ln/min]	VF sonda [%]	VF(CAiB) [%]
7	6.13	5.91
16.4	11.8	12.06
26.7	17.59	17.79
40.4	24.12	23.81
71.77	30.63	30.67

La tabla 5.11 y la gráfica 5.23 muestran información acerca de los puntos de calibración antes mencionados y el polinomio de calibración, para velocidades superficiales aproximadas de la fase líquida de 1.0, 2.0 y 3.0m/s equivalentes a los ensayos A01, a2 y A03 respectivamente. Este polinomio fue empleado para estimar las condiciones de caudal volumétrico CAiB de la fase gaseosa y reducir la dependencia del medidor de presión manométrica, aunque ello requirió una mayor cantidad de tiempo en la ejecución del ensayo.

5.4 Ensayos A



a) $j_f = 1.0$ m/s

b) $j_f = 2.0$ m/s

c) $j_f = 3.0$ m/s

Gráfica 5.23 Polinomio de calibración para $j_i = 1.0, 2.0$ y 3.0 m/s

La tabla 5.12 muestra las condiciones finales del caudal volumétrico de la fase gaseosa para una velocidad superficial de líquido de 1.0 m/s. Se observa una desviación considerable en algunas condiciones entre la fracción de huecos medida con el polinomio, el medidor de presión y la medida por la sonda de conductividad.

5.12 Condiciones de presión ensayos A

Experimento	Fracción de huecos [%]		
CAiB [ln/min]	Polinomio	Presión	Sonda
3.46	3.4049	2.62	4.0
5.82	5.0669	4.05	5.6
9.38	7.4967	6.13	7.8
13.33	10.0627	8.26	8.6
17.27	12.5396	10.18	12.6
21.58	15.0275	12.07	15.0
26.3	17.5395	13.94	17.5
31.39	20.0204	15.73	20.1
37.14	22.532	17.5	22.7
40.68	23.8882	18.31	24.1
43.93	25.0906	18.59	24.6
52.32	27.5245	20.24	25.7
65.05	30.0067	23.22	28.6
78.3	30.8849	25.95	31.7
95.06	29.5327	29.11	34.7

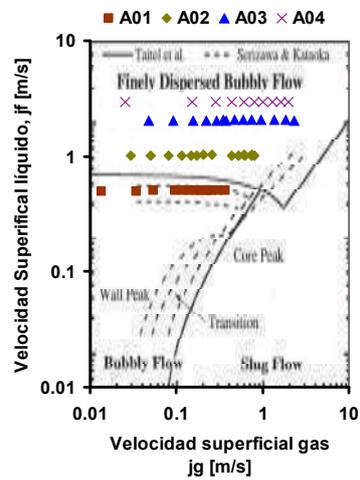
Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales

La tabla 5.13 muestra las condiciones de flujo para el ensayo A. Se establecieron las velocidades superficiales de la fase líquida en 0.5, 1.0, 2.0 y 3.0 m/s aproximadamente. Las fracciones de huecos que se pretenden obtener abarcan el rango de 3% a 30% con incrementos aproximados de 2.5%

5.13. Condiciones de flujo para ensayo A

$j_f = 0.499$ m/s		$j_f = 1.006$ m/s		$j_f = 2.036$ m/s		$j_f = 2.956$ m/s	
Condición	j_g [m/s]						
A01G00	0.000	A02G00	0.000	A03G00	0.000	A04G00	0.000
A01G01	0.013	A02G01	0.029	A03G01	0.048	A04G01	0.026
A01G02	0.035	A02G02	0.050	A03G02	0.093	A04G02	0.153
A01G03	0.054	A02G03	0.081	A03G03	0.155	A04G03	0.289
A01G04	0.097	A02G04	0.115	A03G04	0.224	A04G04	0.440
A01G05	0.122	A02G05	0.150	A03G05	0.296	A04G05	0.606
A01G06	0.142	A02G06	0.435	A03G06	0.350	A04G06	0.804
A01G07	0.166	A02G07	0.528	A03G07	0.382	A04G07	1.020
A01G08	0.188	A02G08	0.627	A03G08	0.477	A04G08	1.286
A01G09	0.218	A02G09	0.736	A03G09	0.594	A04G09	1.618
A01G10	0.237	A02G10	0.802	A03G10	0.740	A04G10	1.988
A01G11	0.257	A02G11	0.173	A03G11	0.964		
A01G12	0.305	A02G12	0.206	A03G12	1.357		
A01G13	0.367	A02G13	0.257	A03G13	1.833		
		B02G14	A02G14				
		B02G15	A02G15				

Los valores mostrados son obtenidos a partir de la adquisición de datos de caudal, presión y temperatura durante la ejecución del ensayo. La siguiente gráfica muestra la ubicación de las condiciones de flujo medidas en un mapa de flujo. Son cubiertas condiciones de flujo bubbly en un amplio espectro, sin embargo limitaciones de tiempo y equipo impidieron ensayar hasta condiciones de flujo slug totalmente desarrollado. Aunque no se indica en el gráfico, las condiciones ensayadas cubren el inicio del cambio del régimen de flujo para todas las condiciones elegidas.



Gráfica 5.24 Mapa de flujo

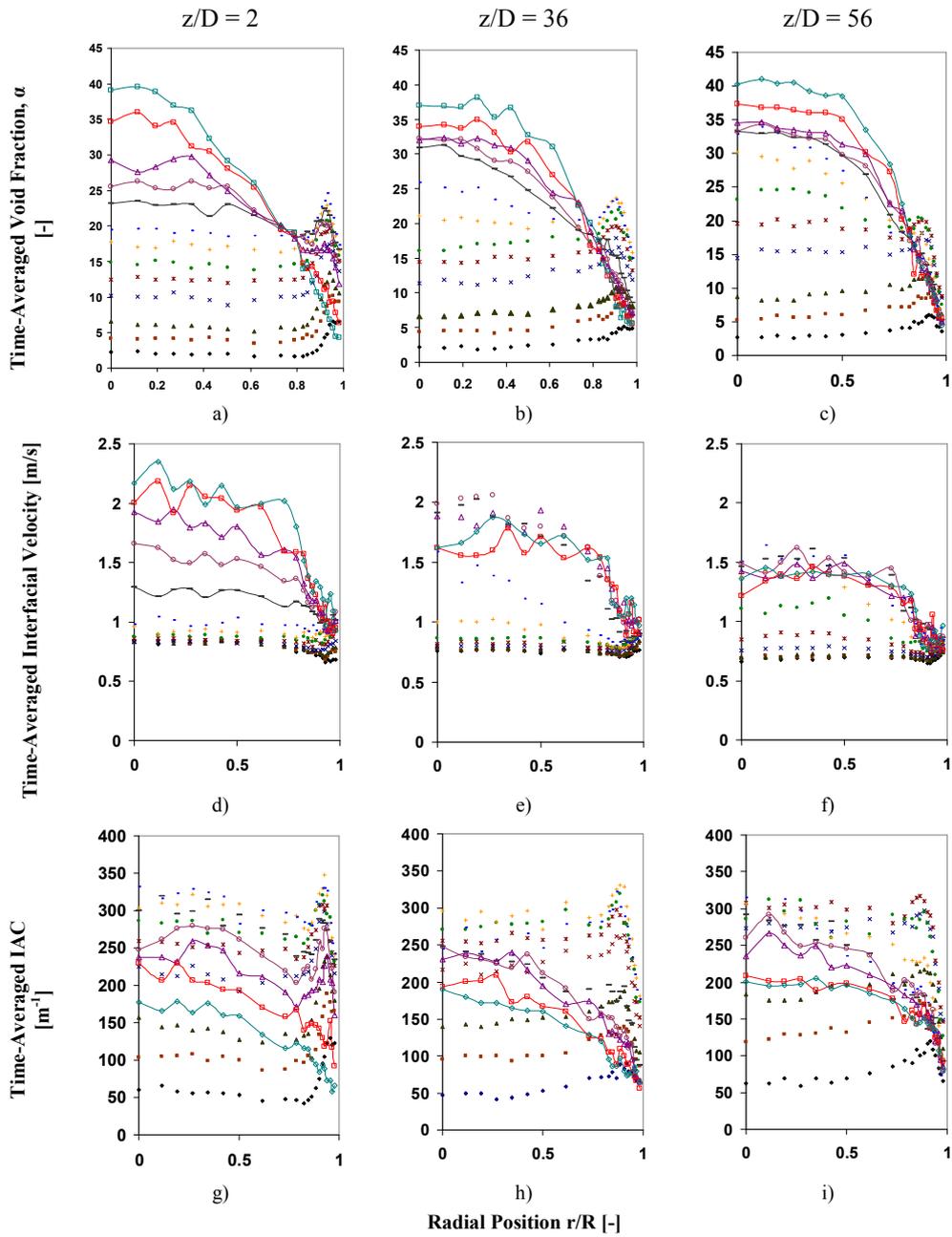
5.4.3 Resultados

Las fracciones de huecos obtenidas mediante el empleo de la sonda de conductividad en la posición axial $z/D = 53$ se muestran en la tabla 5.14. Dada la gran cantidad de información, solamente los resultados para la velocidad de flujo de la fase líquida de 0.5 m/s de los ensayos A se presentan aquí. Para velocidades superiores de fase líquida debe consultarse el anexo, sección 3 en donde se encuentran los perfiles de los principales parámetros de flujo bifásico obtenidos en el ensayo A. En el capítulo siguiente se discuten los resultados aquí presentados.

5.14 Fracción de huecos en los ensayos A

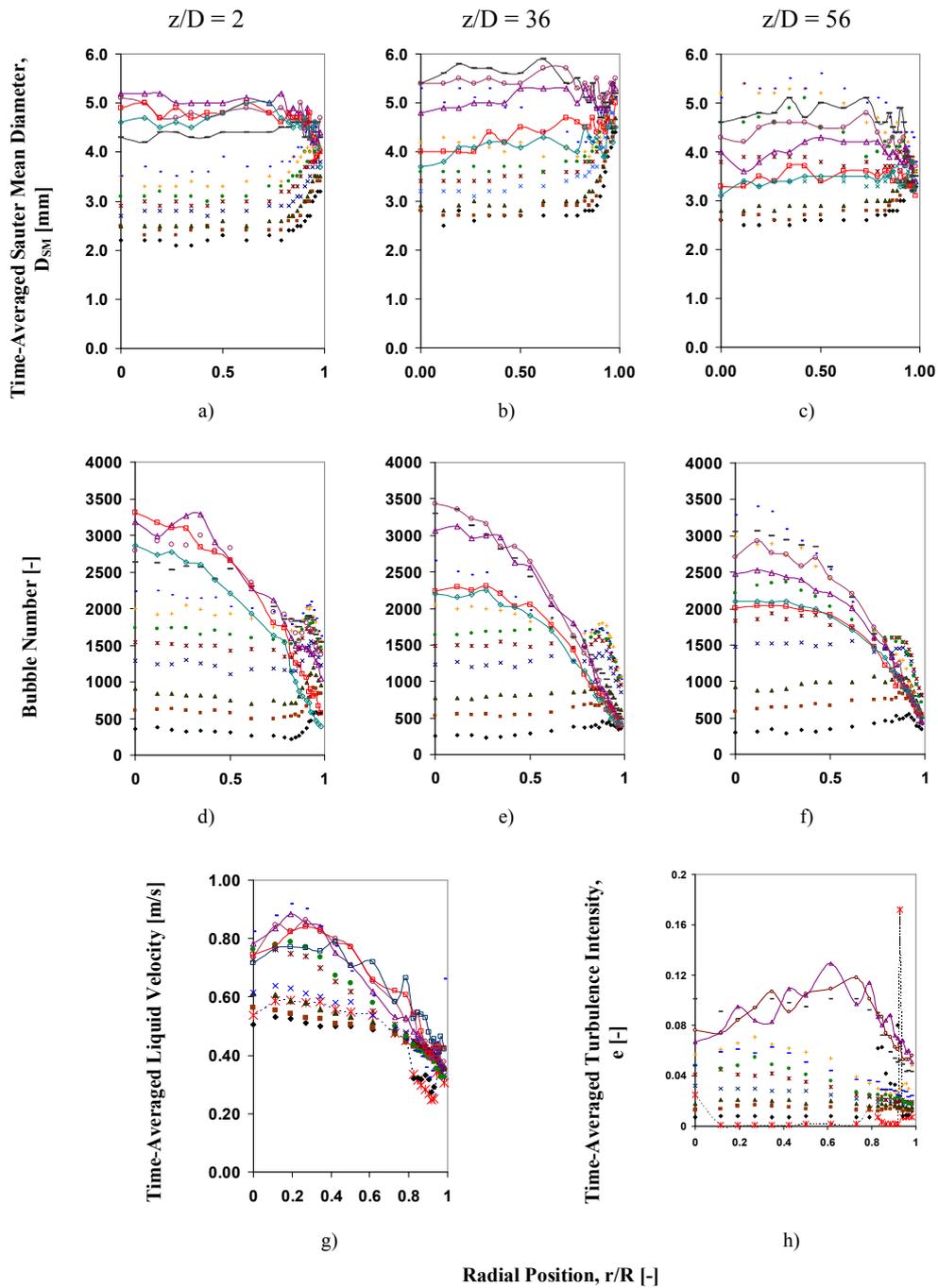
Condición	$\langle\alpha\rangle$	Condición	$\langle\alpha\rangle$	Condición	$\langle\alpha\rangle$	Condición	$\langle\alpha\rangle$
A01G00	0.00	A02G00	0.00	A03G00	0.00	A04G00	0.00
A01G01	3.71	A02G01	4.02	A03G01	2.53	A04G01	0.97
A01G02	6.67	A02G02	5.60	A03G02	5.13	A04G02	4.44
A01G03	9.57	A02G03	7.80	A03G03	7.73	A04G03	3.53
A01G04	13.26	A02G04	8.62	A03G04	9.02	A04G04	9.48
A01G05	18.06	A02G05	12.57	A03G05	14.07	A04G05	12.73
A01G06	19.86	A02G06	15.01	A03G06	14.94	A04G06	15.16
A01G07	21.18	A02G07	17.48	A03G07	17.41	A04G07	16.75
A01G08	21.26	A02G08	20.09	A03G08	19.72	A04G08	18.93
A01G09	22.77	A02G09	22.70	A03G09	21.55	A04G09	20.80
A01G10	23.37	A02G10	24.07	A03G10	23.47	A04G10	23.05
A01G11	23.91	A02G11	24.57	A03G11	27.16		
A01G12	25.32	A02G12	25.67	A03G12	31.81		
A01G13	27.46	A02G13	28.58	A03G13	35.19		
		A02G14	31.66				
		A02G15	34.72				

Los datos de las gráficas 5.25 y 5.26 indicados con puntos son los resultados obtenidos en flujo bubbly, mientras que los datos representados con líneas se presentan de éste modo debido a que indican un régimen de flujo en transición bubbly-slug. Esto fue representado así para efectos descriptivos pues se intenta ilustrar la evolución del pico de pared, lo cual se aprecia observando los cambios de tendencia que presentan la forma del perfil.



Gráfica 5.25 Ensayo A para $j_f = 0.5$ m/s

Capítulo 5. Metodología de Ensayos: Resultados Experimentales



Gráfica 5.26 Ensayo A para $j_f = 0.5$ m/s

5.5 Referencias

[Kataoka1990]. I. Kataoka, A. Serizawa, Interfacial area concentration in bubbly flow, Nucl. Eng. Des. 120 (1990) 163-180.

[Liu1993]. T.J. Liu. Bubble size and entrance length effects on void development in a vertical channel. Int. J. Multiphase Flow. 19 (1993) 99-113.

[Serizawa1987]. A. Serizawa, I. Kataoka, I. Michiyoshi, Phase distribution in bubbly flow. Proceedings of the Second International Workshop on Two-Phase Flow Fundamentals, Data Set No.24, 1987.

Capítulo 6. Análisis

6.1 Introducción	VI - 1
6.2 Fuerzas que actúan sobre la fase gaseosa.....	VI - 2
6.2.1 DRAG FORCE	VI - 3
6.2.2 LIFT FORCE	VI - 7
6.2.3 WALL LUBRICATION FORCE	VI - 12
6.2.4 Turbulent Dispersion Force	VI - 17
6.2.5 Virtual Mass Force.....	VI - 20
6.3 Desarrollo de flujo aire-agua en tubos verticales.....	VI - 23
6.4 Análisis de los resultados obtenidos	VI - 29
6.4.1 Ensayos F	VI - 29
6.4.2 Ensayos B-E.....	VI - 36
6.4.3 Ensayos A	VI - 38
6.5 Nomenclatura	VI - 39
6.6 Referencias.....	VI - 40

6.1 Introducción

La descripción de las interacciones producidas entre fases es necesaria para lograr un suficiente grado de precisión en la predicción de la distribución de la fase gaseosa en los flujos bifásicos gas-líquido, y por lo tanto, en el resto de parámetros locales del flujo. En los últimos años han sido publicados varios trabajos experimentales enfocados al estudio del comportamiento de las burbujas en flujos bifásicos gas-líquidos en tubos verticales [Serizawa1975] [Wang1987] [Liu1993] [Hibiki2001] [Prasser2002] [Lucas2005] [Prasser2007].

El análisis completo de las interacciones entre fases es muy complejo ya que las fuerzas que actúan sobre las burbujas no son sólo dependientes de la estructura local del flujo, gradiente de velocidad o turbulencia, sino que además dependen fuertemente del tamaño de las burbujas. En este sentido son necesarios experimentos muy detallados, con una amplia gama de condiciones experimentales tanto en las velocidades del gas como del fluido y del tamaño de las burbujas, ya que inclusive a bajas concentraciones de gas se establecen amplios rangos de tamaños de burbujas.

En la literatura existen muchos modelos y correlaciones para las diferentes fuerzas que actúan sobre las fases, la mayoría de ellas están basadas en experimentos de efectos separados, es decir que sólo contemplan una fase a la vez. Lo antes dicho indica que no existe certeza de que estos modelos funcionen y puedan explicar los fenómenos que ocurren ya que no se pueden desligar de las condiciones del flujo. Por lo tanto es necesario disponer de condiciones muy controladas en las que se conozcan de forma precisa las condiciones de contorno para poder estudiar la combinación de fuerzas y las expresiones que puedan explicar los fenómenos que ocurren. Como indica Lucas [Lucas2007] los experimentos en tubos verticales son muy adecuados para estudiar los fenómenos que se dan en flujos aire-gas, ya que a unas condiciones de contorno muy bien definidas se unen a una estructura de la fase líquida que se mantiene prácticamente constante, permite el estudio de las migraciones laterales de las burbujas, su crecimiento y su desarrollo.

Es necesario tener conocimiento de la física del problema para poder interpretar los resultados de los experimentos en flujo bifásico, aún cuando se aborden problemas en condiciones adiabáticas con condiciones de contorno controladas.

6.1 Introducción

En éste capítulo, que versa sobre el análisis de los resultados obtenidos, se describirán en primer lugar las fuerzas elementales más importantes que actúan sobre la fase gaseosa, a continuación se explicará en conjunto el comportamiento del flujo bifásico isoterma en tuberías, para después exponer en detalle los resultados obtenidos en la tesis.

6.2 Fuerzas que actúan sobre la fase gaseosa

Existen varias fuerzas que actúan sobre las burbujas, pero para centrar el análisis con vista al logro de los objetivos que se plantea ésta tesis, podemos destacar 5, de las cuales las cuatro primeras determinan fuertemente el comportamiento del flujo. Estas fuerzas se enlistan a continuación:

1. Drag Force (F_D)
2. Lift Force (F_L)
3. Wall Lubrication Force (F_{WL})
4. Turbulent Dispersion Force (F_{TD})
5. Virtual Mass Force (F_{VM})

Es posible incluir más fuerzas, pero en los casos que estudiaremos no poseen relevancia extrema, ejemplo de ello es la Basset Force que tiene importancia cuando el fluido esta casi estático y posee una alta viscosidad, u otras más que se han de añadir para cada caso particular, como presencia de campos exteriores, etc. Antes de describir las fuerzas que actúan sobre las burbujas, deben mencionarse algunos de los parámetros empleados, como son números adimensionales comunes en los trabajos con burbujas.

Número de Reynolds (de la burbuja)

$$Re_{Burbuja} = \frac{Fuerza_{Inercial}}{Fuerza_{viscosa}} = \frac{\rho_f w_{rel} d_0}{\mu_f} \quad (6.1)$$

Donde ρ_l , μ_l son densidad y viscosidad del agua, d_0 es el diámetro de la burbuja y w_{rel} es la velocidad relativa entre las fases. No hay que confundir con el Reynolds de cada fase que contempla la velocidad de fase o el diámetro del tubo

Número de Eötvös:

$$E_0 = \frac{F_{Flotación}}{F_{TensiónSup.}} = \frac{g \cdot (\rho_f - \rho_g) \cdot d_0^2}{\sigma} \quad (6.2)$$

Donde σ es la tensión superficial del agua, y g es la gravedad

Número de Morton:

$$Mo = \frac{g\mu_f^4 \cdot (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2 \sigma^3} \quad (6.3)$$

6.2.1 Drag Force

La *Drag Force* o fuerza de fricción relaciona el arrastre de una fase sobre otra, de forma genérica se puede expresar como:

$$\hat{F}_D = \frac{3}{4} C_D \frac{r_\beta \rho_\alpha}{d_\beta} |\hat{U}_\beta - \hat{U}_\alpha| (\hat{U}_\beta - \hat{U}_\alpha) \quad (6.4)$$

Donde β indica fase gaseosa (dispersa) y α fase líquida (continua), d es el diámetro de la burbuja, y r la fracción de volumen, y C_D es el coeficiente de fricción.

Esta ecuación describe la fuerza de arrastre en forma vectorial y el valor es por unidad de volumen. Es importante recordar que se habla de fuerzas por unidad de volumen, ya que en los códigos de cálculo y sobre todo en los CFD no se trabaja con burbujas individuales, sino con celdas en las que hay una cantidad de gas y que en los modelo son asociadas a un conjunto de burbujas, pero para el código sólo se trata de una masa de gas. Es decir, para nosotros son n_b burbujas, cuyo volumen de gas en total suma $V_b \cdot n_b$, pero para el código es sólo un volumen de gas. Así la fuerza que calcula con el modelo la multiplica por el volumen de gas que tiene en la celda para obtener la fuerza total a aplicar en esa celda debida a la fuerza de arrastre. Lo mismo hará en el resto de fuerzas. Esto en general para todos los códigos que funcionan con el sistema eulerianos/eulerianos.

No todos los modelos matemáticos tienen la misma estructura de ecuación, pero esta forma está muy extendida y aceptada en los códigos CFD. Los distintos modelos que se han desarrollado son lo que cambia en la expresión para el cálculo del coeficiente C_D .

6.1 Introducción

Hay varios modelos ampliamente utilizados para determinar la fuerza de arrastre, y se eligen en función del tipo de simulación que se quiere hacer.

Modelo de Schiller-Nauman: Se trata de un modelo adecuado cuando se pueden considerar las partículas como sólidos rígidos. Esto se puede suponer si el Reynolds de la burbuja se considera bajo, caso de fluidos bastante viscosos. Es decir, no existe distorsión.

Modelos de Ishii-Zuber y Geace: Se trata de modelos que consideran a las partículas como elementos que pueden distorsionarse, y esto es así cuando el Reynolds de la partícula es elevado. Se trata de lo que se llama régimen distorsionado.

Modelo de Grace:

Considera la burbuja distorsionada, una elipse.

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{gd}{U_T^2} \frac{\Delta\rho}{\rho_\alpha} \quad (6.5)$$

Donde la velocidad terminal se expresa como:

$$U_T = \frac{\mu_\alpha}{\rho_\alpha d} M_0^{-0.149} (J - 0.857) \quad (6.6)$$

Donde M_0 es el número de Morton, y J se define como:

$$J = 0.94H^{0.751}, \text{ si } 2 < H < 59.3 \quad (6.7)$$

$$J = 3.24H^{0.4411}, \text{ si } H > 59.3$$

Y H como:

$$H = \frac{4}{3} E_0 M_0^{-0.149} \left(\frac{\mu_\beta}{\mu_{ref}} \right)^{-0.14} \quad (6.8)$$

Capítulo 6. Análisis

En el que $\mu_{ref} = 0.0009 \text{ Kg/ms}$ es la viscosidad del agua de referencia. Este modelo lleva un *Volumen Fraction Correction Exponent*, que por defecto es cero. Si tenemos casos en los que no podemos considerar el conjunto de burbujas totalmente diluido, es decir, que no tienen efecto unas sobre otras, se puede añadir un coeficiente de corrección que tenga en cuenta este efecto. Así, si las burbujas que se contemplan son de tamaño pequeño, estas tenderán a subir más lentamente cuando lo hacen de forma conjunta con fracciones de huecos elevadas por el aumento de viscosidad efectiva de la mezcla, así que valores negativos se colocan en el rango [0, -1], un valor común podría ser -0.5. Este exponente es al que se eleva la fracción de volumen de la fase continua elevada, y el resultado se multiplica por el valor de C_D calculado. En el caso contrario, las burbujas grandes tienden a viajar más rápido a altas fracciones de huecos por las wakes de unas arrastrando a las otras, el exponente es positivo. Se propone un valor de 4 en la mayoría de los casos, pero si hay problemas de convergencia puede disminuir a 2.

Modelo de Tomiyama

En 2004 Tomiyama propuso una correlación para el coeficiente de la *Drag Force* para aguas contaminadas (las aguas normales de los experimentos son contaminadas, ha de ser aguas muy depuradas para considerarlas totalmente limpias), con las siguientes definiciones previas:

Mean Aspect Ratio:

$$E_{or} = \frac{1}{1 + 0.163 E_o^{0.757}} \quad (6.9)$$

Funcio F:

$$F(E_{or}) = \frac{\frac{1}{\cos E_{or}} - E_{or} \sqrt{1 - E_{or}^2}}{1 + E_{or}^2} \quad (6.10)$$

Function G:

$$G(E_{or}) = \frac{E_{or} \sqrt{E_{or}^2 - 1} - \frac{1}{\tanh(\sqrt{E_{or}^2 - 1})}}{E_{or}^2 - 1} \quad (6.11)$$

6.1 Introducción

Si el diámetro de la burbuja es inferior a 0.8 mm, el coeficiente C_D se define como:

$$C_D = \begin{cases} \frac{16}{\text{Re}} (1 + 0.015 \text{Re})^{0.687} \end{cases} \quad (6.12)$$

Si el diámetro es superior o igual a 0.8 mm y para $E_{0r} < 1$:

$$C_D = \begin{cases} \frac{8}{3} \frac{E_0}{\frac{E_{0r}^{2/3} E_0}{1 - E_{0r}^2} + 16E_{0r}^{4/3}} \frac{1}{F(E_{0r})^2} \end{cases} \quad (6.13)$$

Para $E_{0r} = 1$:

$$C_D = 6 \quad (6.14)$$

Para $E_{0r} > 1$:

$$C_D = \begin{cases} \frac{8}{3} \frac{E_0}{\frac{E_{0r}^{2/3} E_0}{E_{0r}^2 - 1} + 16E_{0r}^{4/3}} \frac{1}{G(E_{0r})^2} \end{cases} \quad (6.15)$$

Las siguientes gráficas sólo son orientativas, para tener un cierto orden de magnitud de los valores.

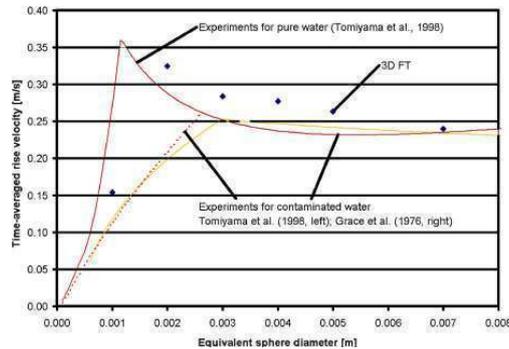


Figura 6.1

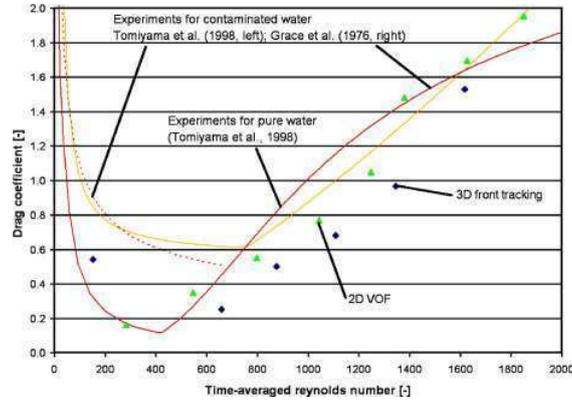


Figura 6.2

Tomiyama desarrollo su ecuación en función del parámetro E_n en vez del E_{or} . El parámetro E se define como $E_n = b/a$, representado en la figura 6.3.

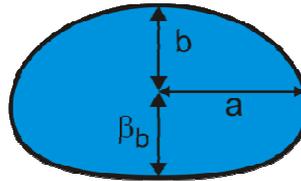


Figura 6.3

Pero para $E_o < 40$ Clift propone una relación entre la relación para el ratio entre el el perímetro vertical y el horizontal:

$$E = \frac{1}{1 + 0.163E_o^{0.757}} \quad (6.16)$$

6.2.2 Lift force

Si las burbujas se mueven en un fluido en el que existe un gradiente de velocidades, la burbuja se mueve con una velocidad relativa que no será constante en toda la superficie de la misma, creándose una distribución asimétrica de la presión provocando una fuerza neta, la *lift force*, que actúa sobre la burbuja de forma perpendicular al movimiento relativo de la burbuja. En los años 80 y 90 se realizaron muchos experimentos para estudiar la migración lateral de las burbujas, e identificar los principales parámetros que caracterizaban dicha migración.

6.1 Introducción

Se observo que las burbujas de tamaño pequeño migraban del centro hacia las paredes y en cambio las de mayor tamaño lo hacia el centro del canal,[Zun1988],[Liu1993] [Hibiki1999,2001,2003]. Los mayores parámetros que afectan a la *lift force* [Hibiki2007] son la velocidad relativa entre la partícula y el ambiente, el esfuerzo constante o gradiente de velocidades en el fluido que envuelve la partícula, la rotación de la partícula y la superficie de la misma si se la puede considerar slip o no-slip, por ejemplo por la presencia de surfactantes.

La Lift Force suele ser expresada como:

$$F_L = -C_L r_\beta \rho_\alpha (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \times \text{rot}(\vec{U}_\alpha) \quad (6.17)$$

Esta expresión fue propuesta por Drew y Lahey [Drew1987] y Auton [Auton1987], desde entonces esta forma de expresar la *lift force* está muy generalizada. Pero esta expresión y el modelo en sí fue desarrollado para esfera rígidas, y por tanto, para el caso de burbujas no puede aplicarse directamente, ya que hay que tener en cuenta no solo estos parámetros que afectan a la fuerza lateral, sino que hay que deben añadirse además los efectos de la deformación de la superficie de la burbuja, los cuales afectan a la estructura de su estela, que a su vez afecta a la estructura del flujo alrededor de la burbuja, modificando así la fuerza lateral. Moraga [Moraga1999] indica que el efecto de los vórtices que se crean en la estela de la burbuja tienen un gran efecto sobre la fuerza lateral, sobre todo cuando la superficie de la burbuja se vuelve asimétrica, lo que ocurre cuando el tamaño de la burbuja aumenta, por lo que es necesario incluirlo en la expresión de la *lift force*. Por tanto, a manera de resumen se puede decir que el tamaño de la burbuja y la compleja interacción entre los vórtices creados en su estela así como el gradiente de velocidades del fluido que la rodea juegan un papel muy importante en la migración lateral de las burbujas [Serizawa1988] [Serizawa1994] [Tomiyaama2002].

Uno de los factores característicos que aparecen en estos casos es la inversión del signo del coeficiente de la *lift force*. Es decir, existe la posibilidad de que cambie el signo de la fuerza lateral, empujando a las burbujas hacia el centro de la tubería, es decir en sentido contrario al anterior. Tanto Tomiyama [Tomiyaama1995] de forma experimental, como Ervin y Tryggvason [Revin1997] muestran este efecto en que la *lift force* puede cambiar de signo si existe una deformación sustancial en la burbuja. Moraga [Moraga1999] es su extenso artículo discute con detalle este punto y apunta las mismas causas para explicar el cambio de signo, pero además incluye que la rotación y las asimetrías en la estela producida por la burbuja también puede ahondar en ese sentido, y cita trabajos como los de

Capítulo 6. Análisis

Taneda [Taneda1957] que muestran como incluso la rotación de esferas rígidas pueden mostrar asimetrías en su estela y cambiar el signo de la fuerza lateral.

Así, se podría decir que hay dos tipos de *lift force*, una debida al gradiente de velocidades del fluido y a la rotación de la propia burbuja, y otra debido a la deformación de la burbuja y su efecto sobre su wake que hace que se desvíe hacia los laterales. Todavía hoy en día no existe una mediana comprensión de esta fuerza lateral, y será necesario seguir haciendo un gran esfuerzo tanto experimental y teórico para su completa comprensión.

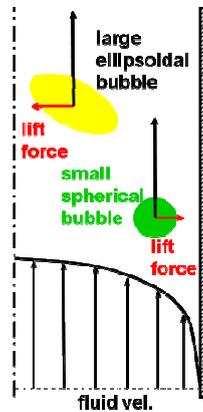


Figura 6.4

Modelo de Tomiyama (1998):

En base a las definiciones de un número de Eötvös modificado:

$$Eo_d = \frac{g(\rho_f - \rho_g)d_h^2}{\sigma} \quad (6.18)$$

En el que d_h es la máxima dimensión horizontal de la burbuja. Este d_h se calcula utilizando una expresión empírica:

$$d_h = d_b \sqrt{1 + 0.163Eo^{0.757}} \quad (6.19)$$

Con esto Tomiyama propone el siguiente coeficiente para la Lift Force:

6.1 Introducción

$$\begin{aligned}
 C_L &= \min[0.288 \tanh(0.121 \text{Re}), f(Eo_d)] & Eo_d < 4 \\
 C_L &= f(Eo_d) & 4 < Eo_d < 10 \\
 C_L &= -0.27 & Eo_d > 10
 \end{aligned}
 \tag{6.20}$$

Y en la que se define la función del número de Eötvös como:

$$f(Eo_d) = 0.00105 Eo_d^3 - 0.0159 Eo_d^2 - 0.0204 Eo_d + 0.474
 \tag{6.21}$$

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de C_L de Tomiyama en función del diámetro de la burbuja. Como se puede ver hay un cambio de signo. Eso indicativo de en función del tamaño de la burbuja la lift force llevará a las burbujas pequeñas hacia la pared o hacia el centro las grandes. En el caso de agua-aire el tamaño crítico se sitúa sobre los 5.8 mm. Pero esto cambia mucho con la presión, la temperatura, o el tipo de fluidos, es decir sí es aire o es vapor, etc. Si la presión aumenta los diámetros en los cuales se produce el cambio disminuyen.

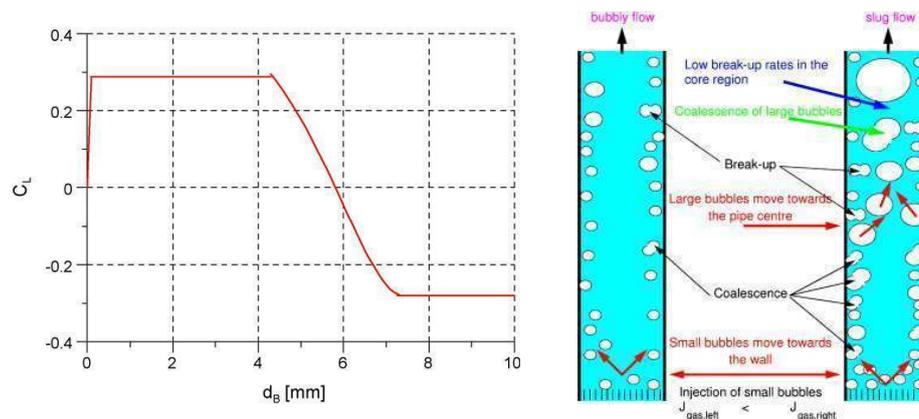


Figura 6.5

Modelo de Hibiki (2007)

Hibiki ha desarrollado un modelo basado en una búsqueda muy exhaustiva de la bibliografía existente. Su modelo se basa encontrar un modelo para el caso de burbujas asimiladas a sólidos rígidos, es decir, no deformables, y después multiplicarla por un factor corrector que tenga en cuenta el efecto de la deformación sobre la lift force.

Cuando no considera deformación, con la siguiente definición:

$$G = \frac{0.5d_b\omega}{w_{rel}} \quad (6.22)$$

Donde ω es la magnitud del gradiente de velocidades. Así define para una burbuja esférica:

$$C_L = \sqrt{[C_L^{lowRe}(Re, G)]^2 + [C_L^{highRe}(Re)]^2} \quad (6.23)$$

Donde los C_L para bajos y altos Re son:

$$C_L^{lowRe}(Re, G) = \frac{6}{\pi^2 (2ReG)^{0.5}} \frac{2.255}{\left(1 + \frac{0.1Re}{G}\right)^{3/2}} \quad (6.24)$$

$$C_L^{highRe}(Re) = \frac{0.5(1 + 16Re^{-1})}{1 + 29Re^{-1}} \quad (6.25)$$

Aquí, el problema que se ha de resolver para poder utilizar esta ecuación es el cálculo de G ya que depende de la dirección que se tome.

Cuando existe deformación, lo que se hace es multiplicar la expresión anterior por un factor de modificación:

$$C_L = \xi \sqrt{[C_L^{lowRe}(Re, G)]^2 + [C_L^{highRe}(Re)]^2} \quad (6.26)$$

Este factor de corrección se ha obtenido basándose en los datos de Tomiyama,

$$\xi = 2 - e^{0.136E_0^{1.11}} \quad (6.27)$$

Bebe tomarse en cuenta que para $E_0=4.36$ el diámetro equivalente sería de 5.22 que es muy próximo al que se da cuando se cambia de sentido en mezclas agua-aire.

6.2.3 Wall lubrication force

Cerca de la pared la velocidad del fluido sobre la superficie de la burbuja se modifica, lo que provoca fuerzas preferenciales sobre la misma que la empujan en dirección contraria a la pared. Esta fuerza sólo actúa en la vecindad más inmediata de la pared, y rápidamente decae de forma prácticamente exponencial, y a los pocos milímetros de la pared dejar de tener efecto, desapareciendo prácticamente

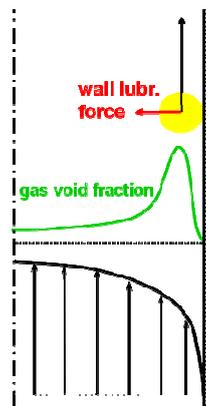


Figura 6.6

En los últimos años el estudio de la reducción de la fuerza de arrastre inyectando microburbujas en las superficies en contacto con el fluido ha tenido un gran auge, lo que ha proporcionado resultados experimentales que han permitido mejorar la comprensión del comportamiento de las burbujas cerca de las paredes pero que todavía no está completamente comprendido.

Hoy en día todavía hay pocos datos experimentales disponibles en la literatura en la que se describa como afecta la turbulencia a la distribución de la fase gas y la trayectoria de las burbujas. Ni tan siquiera en caso sencillos como una capa límite turbulenta sobre placas planas. Entre los pocos cabría destacar los trabajos de Lance [Lance1991] y los de Moursali [Moursali1995], o mas recientemente los de Felton [Felton2001] o los recientemente publicados de Zaruba [Zaruba2007] o Descamps [Descamps2008]. La interacción de entre burbujas y flujos de líquidos con gradientes de velocidad desarrollados causa la migración de burbujas en sentido transversal, como ya comentó Tomiyama [Tomiyama2002] en sus trabajos. Así en un flujo vertical y hacia arriba en el que se estable un gradiente de velocidades en el líquido, las burbujas tienden a moverse hacia las paredes en la que la velocidad es menor, siempre y cuando no excedan un cierto diámetro crítico, por lo que existirá una acumulación de

burbujas muy próxima a la pared. En dicha zona, las burbujas tienen dos tipos de movimiento, uno de deslizamiento rectilíneo paralelo a la pared, y otro muy distinto en un movimiento de rebote o colisión constante con la pared o “bouncing”. Tanto Felton como posteriormente Zaruba reportan este tipo de movimientos.

Zaruba [Zaruba2007] realizó un estudio tanto teórico como experimental del movimiento de rebote de las burbujas en las paredes. Propuso un modelo, que predecía este tipo de movimiento, mediante un balance de fuerzas en sentido horizontal:

$$\left(\rho_g + C_v \rho_f\right) \frac{Du}{Dt} = f_{drag} + f_{lift} + f_{wall} + f_{deform} \quad (6.28)$$

En el que la inercia de la masa de la burbuja, del gas de la burbuja mas la debida a la masa virtual, es balanceada por la fuerza de arrastre, la *lift force*, la fuerza de la pared e introdujo al fuerza debida a la deformación de la burbuja. Sobre esta última fuerza, Lucas [Lucas2004] reportó que en burbujas de diámetros equivalentes dentro del rango de [2-4] mm se acercaban a la pared deformándose, de modo que su centro teórico quedaba casi sobre la misma pared. Esto indicaba que existía una deformación evidente hacia formas elipsoides de la burbuja, lo que contrastó con técnicas visuales. A través de la energía de deformación necesaria dedujo la fuerza de deformación que actúa sobre las burbujas como:

$$f_{def} = \frac{3\sigma}{D_{eq}^2} \left[\frac{1}{1-y^6} \left(3y + \frac{\arcsen\sqrt{1-y^6}}{\sqrt{1-y^6}} \left(\frac{1}{y^2} - 4y^2 \right) - 2y \right) \right] \quad (6.29)$$

$$y \equiv \frac{2x}{D_{eq}} \quad (6.30)$$

Esta fuerza de deformación actúa como un resorte que empuja a la burbuja hacia fuera de la pared, en el que el eje X es perpendicular a la pared.

Cuando una burbuja se mueve hacia la pared y choca contra ella, la burbuja se deforma, continuando con el movimiento hacia la pared incluso cuando su superficie ya ha impactado. Una vez alcanza la máxima deformación, la burbuja sale rebotada en dirección opuesta, ayudada por la fuerza de la pared o *wall lubrication force*, hasta que alcanza cierta

6.1 Introducción

distancia en la que su velocidad se hace cero y vuelve a ser empujada, por la lift force, hacia la pared repitiéndose el mismo proceso. En cada proceso se pierde cierta energía debido principalmente a la fuerza de arrastre que se opone al movimiento de la burbuja, y la amplitud disminuye, por lo que llega un punto en el que estos rebotes cesan y las burbujas se mueven en forma rectilínea o como se suele conocer en movimiento “sliding”. La amplitud de los rebotes decrecen cuando la velocidad superficial del líquido aumenta y aumenta cuando esta decrece [Zaruba2007], debido entre otros al hecho de que la lift force se vuelve poco importante cuando la velocidad del líquido disminuye. Existe también una velocidad superficial crítica por debajo de la cual las burbujas mantienen el movimiento de rebote durante mucho más tiempo. Al final, la posición de las burbujas cerca de la pared es aquella en la que se alcanza un equilibrio entre las fuerzas laterales, sobre todo la lift force por un lado y la wall force y la fuerza de deformación por otra. Mikielewickz [Mikielewickz07] también proporcionan modelos que pueden predecir el comportamiento de burbujas individuales cerca de la pared en este movimiento de rebote

Los rebotes de los que hemos hablado más que contra la pared se realizan sobre una capa delgada de líquido que se forma sobre la pared en los flujos con burbujas. Pero esta capa de líquido de pocos milímetros que se forma no tiene un grosor constante, sino que como consecuencia del paso de las burbujas, el grosor de la capa de líquido sobre la pared fluctúa, como indica Descamps [Descamps08] en base a los resultados experimentales obtenidos. Según este autor, podemos considerar que en el tubo vertical para velocidades superficiales de líquido del orden de 1 m/s hay una capa de líquido junto a la pared de 2-3 mm, la cual oscila, pero en la que podemos decir que siempre existirá una capa libre de burbujas de entorno 500 micras. El hecho de que exista esta capa de líquido tiene algunas implicaciones que ha de tenerse en cuenta, la primera que las burbujas resbalarán sobre esta capa, lo que permite modelizar como free slip la condición de pared de la fase dispersa. La segunda, que el choque se realiza sobre un medio que puede deformarse y cambiar, lo que complica mucho el modelo a utilizar, también que la deformación de la interfase de las burbujas en su choque puede resultar muy complicado.

Antal [Antal91] basándose en la teoría del flujo potencial derivó una fórmula para la fuerza repulsiva que repele a la burbuja de la vecindad de la pared. Los modelos se desarrollaron en un cilindro vertical en condiciones de $Re_b < 1500$ y para fracciones de gas menores del 10%. La expresión a la que llegó es:

$$F_{WL}^{fluid} = -F_{WL}^{gas} = -\frac{r_d \rho_c}{d_p} C_{WL} \left(\bar{U}_{rel} - (\bar{U}_{rel} \hat{n}_w) \cdot \hat{n}_w \right)^2 \hat{n}_w \quad (6.32)$$

Recordemos que r es la void fraction, el subíndice c hace referencia a la fase continua (líquido) y d a la discreta (gas), d_p es el diámetro de la partícula (burbuja), y y_w es la distancia a la pared. Para la fórmula de Antal la C_{WL} es:

$$C_{WL} = \max \left(C_1 + \frac{C_2 d_p}{y_w}, 0 \right) \quad (6.33)$$

Lo valores sugeridos para estos coeficientes son muchos:

Tabla 5.1

	C_1	C_2
Original Antal	-0.01	0.05
Krepper + Prasser	-0.0064	0.016
Krepper	-0.0064	0.05

Hay otra forma de expresar esto de forma cómoda como:

$$F_{WL}^{fluid} = -F_{WL}^{gas} = -r_d \rho_c C_{WL} \left(\bar{U}_{rel} - (\bar{U}_{rel} \hat{n}_w) \cdot \hat{n}_w \right)^2 \hat{n}_w \quad (6.34)$$

Y colocar la expresión del coeficiente como:

$$C_{WL} = \max \left(\frac{C_1}{d_p} + \frac{C_2}{y_w}, 0 \right) \quad (6.35)$$

Con esto la expresión del coeficiente queda de forma no adimensional, pero resulta cómodo ya que el resto de expresiones se puede introducir de forma sencilla, ya que sólo se ha de modificar el C_{WL} .

Tomiyama [Tomiyama98] propuso un modelo más exacto para aire-agua modificando la expresión de Antal, en el que se tiene en cuenta el número de Eötvös, y utilizó sus propios experimentos para obtener las expresiones. Más que una nueva fórmula lo que hizo fue proponer una

6.1 Introducción

nueva expresión para coeficiente mucho mas elaborada de la expresión propuesta por Antal:

$$C_{WL} = C_{LW}(Eo) \frac{d_p}{2} \left(\frac{1}{y_w^2} - \frac{1}{(D - y_w)^2} \right) \quad (6.36)$$

Donde D es el diámetro de la tubería, y $C_{LW}(Eo)$ se define como:

$$C_{LW}(Eo) = e^{-0.993Eo+0.179} \quad 1 \leq Eo \leq 5$$

$$C_{LW}(Eo) = 0.00599Eo - 0.0187 \quad 5 \leq Eo \leq 33 \quad (6.37)$$

$$C_{LW}(Eo) = 0.179 \quad 33 < Eo$$

En las siguientes graficas se muestra la comparación entre ambas y el comportamiento de $C_{LW}(Eo)$

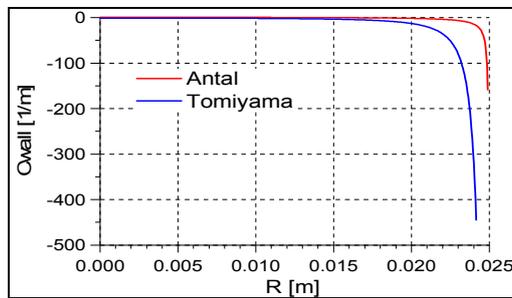


Figura 6.7

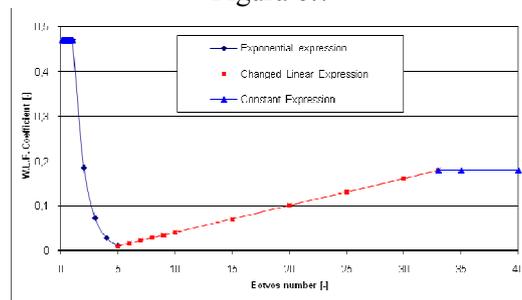


Figura 6.8

Capítulo 6. Análisis

En el caso de Antal la dependencia cerca de la pared es $1/y_w$ en cambio en Tomiyama esta es $1/y_w^2$ lo que reproduce mucho mejor los resultados. El problema de Tomiyama es la dependencia con el diámetro de la tubería. Para evitar esto Frank [Frank05] propone una correlación generalizada basada en la de Tomiyama:

$$C_{WL} = C_{LW}(Eo) \max \left\{ 0, \frac{1}{C_{WD}} \frac{1 - \frac{y_w}{C_{wc} d_p}}{y_w \left(\frac{y_w}{C_{wc} d_p} \right)^{p-1}} \right\} \quad (6.38)$$

Donde el cut-off coeficiente $C_{wc}=10$, el damping coeficiente $C_{WD}=6.8$ y el coeficiente exponencial $p=1.7$.

En la siguiente gráfica se han comparado los C_{wL} de los tres modelos en el que el de Antal ya está expresado en la segunda forma en unidades de $1/m$

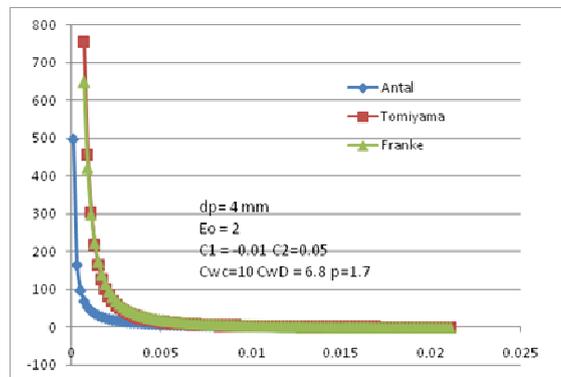


Figura 6.9

Tomiyama y Franke ofrecen resultados muy parecidos. La ventaja de Franke es que no depende de la geometría y hay más parámetros para “ajustar” el modelo y la dependencia y amplitud de las fuerzas.

6.2.4 Turbulent Dispersion Force

Es una fuerza de dispersión de las fases desde los lugares de alta concentración a los de baja concentración de void fraction, debido fundamentalmente a las fluctuaciones de la turbulencia. Esto es debido a la combinación de los torbellinos turbulentos y la fuerza de arrastre que se

6.1 Introducción

establece entre las fases. La dispersión turbulenta tiene una gran influencia sobre el perfil radial de fracción gas, esta determina la forma de los wall peak. Por ejemplo, en el caso de que la lift force tenga sentido negativo, es decir, cuando hace que las burbujas migren hacia el centro, esta fuerza es la única que empuja a las burbujas desde el centro hacia la pared. Lo mismo ocurre en el caso contrario en el que existe una mayor concentración cerca de las paredes.

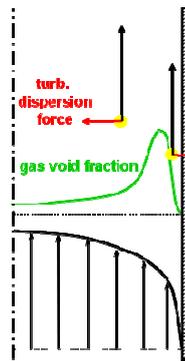


Figura 6.10

Lahey [Lahey1993] derivó la ecuación siguiente para calcular la fuerza de dispersión por unidad de volumen:

$$\vec{F}_{TD} = -C_{TD} \cdot \rho_f \cdot k_t \cdot \vec{\nabla} \alpha \quad (6.39)$$

Donde k_t es la energía cinética turbulenta del fluido. Lopez de Bertodano [Bertodano1998] propuso una expresión para el coeficiente C_{TD} que tenía en cuenta la dispersión turbulenta no homogénea:

$$C_{TD} = C_\mu^{1/4} \frac{1}{St \cdot (1 + St)} \quad (6.40)$$

$$St = \frac{\tau_g}{\tau_f} \quad \tau_g = \frac{8}{3} \frac{r_b}{C_D \cdot |\vec{U}_{rel}|} \quad \tau_f = C_\mu^{3/4} \cdot \frac{k}{\varepsilon}$$

Donde U_{rel} es la velocidad relativa entre fases, k es la energía cinética turbulenta y ε la disipación turbulenta, y C_D el coeficiente de la fuerza de arrastre, y r_b el radio de la burbuja y C_μ es una constante del modelo k - ε que suele valer 0.09. τ_g es el tiempo de respuesta de las

Capítulo 6. Análisis

burbujas y τ_f es la escala de las eddies del líquido. Gosman [Gosman1992] propuso otra expresión:

$$\vec{F}_{TD} = -\frac{3.C_D \cdot v_{t,f}}{4.d_b \cdot Pr_t} \cdot \rho_f \cdot w_{rel} \cdot \vec{\nabla} \alpha \quad Pr_t = \frac{v_f^{eff}}{v_g} \quad (6.41)$$

En la que se ve como hacia depender la fuerza de dispersión del coeficiente de la fuerza de arrastre, C_D , y Pr_t es el número de Prandtl turbulento que suele tener un valor del orden de la unidad.

Basándose en esta expresión, autores como Drew [Drew2001], Carrica [Carrica1999] o Burns [Burns2004] proponen un modelo basado en promediados de Favre de modelos de arrastre. Moraga [Moraga2001,2003] muestra que la formulación se se hace de esta fuerza de dispersión turbulenta se corresponde con un término de difusión en la ecuación de la masa:

$$D = \frac{v_f^{eff}}{Pr_t} \quad (6.42)$$

6.2.5 Virtual Mass Force

Se trata de una fuerza que tiene en cuenta que aunque las burbujas tienen muy poca masa comparada con la que tendrían si fuese el volumen de fase líquida, al moverse tienen que apartar una capa de líquido que hay sobre ellas para moverse, y por tanto deberán hacer una fuerza extra, como si tuviesen inercia, es decir peso, el peso de la masa de agua que desplazan al moverse. Por eso se llama “masa virtual”. Se intenta considerar el trabajo realizado para mover el fluido y apartarlo, el cual es realizado a costa de la energía de la partícula.

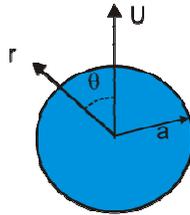


Figura 6.11 Burbuja moviendo con velocidad relativa U

Podríamos considerar la energía cinética del fluido que envuelve la partícula, considerando que suficientemente lejos el fluido está quieto:

$$E_c = \frac{\rho_f}{2} \int_{\forall} u^2 d\forall \quad (6.43)$$

Donde la integral se toma sobre todo el fluido. Si asumimos que el fluido es incompresible, la velocidad la podemos expresar en base a la función potencial como $\vec{u} = \nabla\phi$, donde la función potencial del fluido alrededor de una esfera de radio a en movimiento:

$$\phi = -\frac{Ua^3}{2r^2} \cos\theta \quad (6.44)$$

Capítulo 6. Análisis

Donde r y θ son las coordenadas cilíndricas de las posiciones radiales respecto al centro de la esfera y posición acimutal. Así la energía cinética se expresa como:

$$E_c = \frac{\rho_f}{2} \int_{\forall} \nabla \phi \cdot \nabla \phi d\forall = \frac{\rho_f}{2} \int_{\forall} \nabla(\phi \cdot \nabla \phi) \cdot d\forall \quad (6.45)$$

Y ahora aplicando el teorema de Gauss tenderíamos:

$$E_c = \frac{\rho_f}{2} \int_s \phi \cdot \nabla \phi \cdot \hat{n} dA \quad (6.46)$$

Donde S será la “superficie” que envuelve al fluido alrededor de la burbuja, es decir, la superficie de la burbuja. La componente radial de la velocidad la podemos expresar utilizando la derivada de la función potencial como:

$$u_r = \frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{Ua^3}{r^3} \cos \theta \quad (6.47)$$

Y si consideramos la velocidad sobre la superficie de la burbuja, cuando $r = a$:

$$u_r = U \cos \theta \quad (6.48)$$

Ahora operando sobre la superficie de la esfera:

$$\nabla \phi \cdot \hat{n} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \hat{e}_\theta \right) \cdot (-\hat{e}_r) = \frac{\partial \phi}{\partial r} = -U \cos \theta \quad (6.49)$$

El signo negativo aparece porque hemos de ver la esfera como la superficie que envuelve al fluido, es decir el vector normal a la superficie es hacia dentro de la burbuja, hacia fuera del fluido. Ahora, sustituyendo en la ecuación de la energía cinética:

$$E_c = \frac{\rho_f}{2} \int_0^\pi \frac{U^2 a}{2} \cos^2 \theta (a^2 2\pi \sin \theta) d\theta \quad (6.50)$$

6.1 Introducción

Que operado e integrado queda como:

$$E_c = \frac{U^3 a^3 \pi \rho_f}{3} = 0.25 M_f U^2 \quad (6.51)$$

Donde M_f es la masa del fluido, o “masa virtual” , que como se ve se es en verdad la mitad de la masa de fluido ocupada por la burbuja, lo que da sentido al coeficiente estándar de 0.5 para la masa virtual. La variación de la energía cinética es igual al trabajo realizado por la fuerza debida a la masa virtual

$$F_{mv} \cdot U = \frac{dE_c}{dt} = \frac{a^3 2\pi\rho_f}{3} U \cdot \frac{dU}{dt} \quad (6.52)$$

De lo que se deduce que la fuerza debida a la masa virtual será:

$$F_{mv} = \frac{a^3 2\pi\rho_f}{3} \frac{dU}{dt} = 0.5 M_f \frac{dU}{dt} \quad (6.53)$$

Generalizando la expresión, la velocidad que hemos de considerar será la relativa, y la derivada de la velocidad será la derivada total, con lo que queda la expresión como:

$$F_{mv} = \frac{\forall_b \rho_f}{2} \left(\frac{DU_g}{Dt} - \frac{DU_f}{Dt} \right) \quad (6.53)$$

Donde \forall_b es el volumen ocupado por la burbuja. Si ahora expresamos la fuerza por unidad de volumen, lo que facilita su utilización en los códigos:

$$F_{mv} = C_{vm} \alpha \rho_f \left(\frac{DU_g}{Dt} - \frac{DU_f}{Dt} \right) \quad (6.54)$$

Donde C_{vm} es coeficiente de masa virtual que en este caso tiene un valor de 0.5 el cual es aplicable a flujos potenciales y a flujos de Stokes. Mougouin y Magnaudet [Mougouin2002] indicaron recientemente que este coeficiente también era correcto aplicarlo a burbujas esféricas en flujos viscosos. Para burbujas de forma esferoide, la mayoría de los casos,

Tomiyama [Tomiyama2004] propuso una nueva correlación para el coeficiente, al que consideró ya como un tensor, ya que variaba su valor en función de la dirección por la forma diferenciada que ofrece el esferoide.

Esta fuerza tiene sentido cuando existen aceleraciones de las burbujas, pero en el caso de flujos desarrollados en tubos, las velocidades son más o menos constantes, por lo que las variaciones de la velocidad son muy reducidas, salvo en las primeras zonas de flujo en desarrollo. Así, en general podemos decir que tiene poca relevancia en comparación al resto de fuerzas. En la simulación se suelen despreciar o no considerar.

6.3 Desarrollo de flujo aire-agua en tubos verticales

En la actualidad aún no se comprenden por completo los mecanismos de relaciones entre fases, sobre todo en la transición entre regímenes aún en la configuración más sencilla posible de flujo bifásico agua-aire en una tubería vertical. Solamente en condiciones de concentración de gas muy reducidas existen modelos que predicen el comportamiento de todas las variables, desde luego en una configuración muy sencilla.

En el flujo bifásico vertical ascendente las burbujas de pequeño tamaño tienden a moverse hacia posiciones cercanas a la pared, mientras que las de gran tamaño lo hacen hacia el centro de la sección. Tomiyama [Tomiyama1998] observó este comportamiento para burbujas simples en sus experimentos, otros investigadores han observado el mismo comportamiento en casos en los que existen grupos o paquetes de burbujas [Prasser2000]. En el caso de flujo agua-aire en condiciones estándar (presión atmosférica y temperatura ambiente) existe un diámetro crítico de la burbuja aproximadamente de 5 a 6 mm en el cual la burbuja cambia la dirección de migración de la pared hacia el centro. De este modo la distribución radial de la fase gaseosa depende fuertemente del tamaño de la burbuja, este es el fenómeno clave para determinar la transición entre el régimen de bubbly y slug en flujo vertical ascendente [Lucas2003]. Puede decirse que el cambio en el régimen de flujo depende de las fuerzas que actúan sobre las burbujas, y de la interacción entre ellas (desintegración y coalescencia).

La estructura de flujo en una sección cilíndrica vertical con flujo ascendente está definida mediante un mapa de flujo. Existen mapas de flujos como los de Taitel o Ishii que dependen exclusivamente de la velocidad superficial del líquido y del gas, y que sirven para flujos completamente desarrollados. Determinar el régimen y la zona de transición es una tarea sujeta a una gran subjetividad. Lucas catalogó los regímenes de flujo en siete distintas variedades [Lucas2005]:

6.3 Desarrollo de flujo aire-agua en tubos verticales

1. Flujo Bubbly finamente disperso
2. Flujo Bubbly con *wall peak*
3. Flujo Bubbly Flow en region de transición
4. Flujo Bubbly con *core peak*
5. Flujo Bubbly con distribución de tamaño de burbuja bimodal
6. Flujo slug
7. Flujo anular

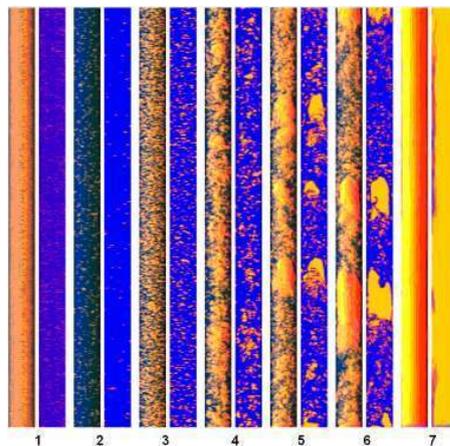


Figura 6.12 Regimenes de flujo propuestos por Lucas [Lucas2005]

El mapa de flujo de Taitel [Taitel1980] esta representado en la figura 6.13 y se ha empleado en el capítulo anterior para mostrar las condiciones de iniciales de los ensayos realizados. Se observan en él zonas de transición entre regímenes situadas sobre las líneas de rayas discontinuas, tanto de flujo bubbly finamente disperso a bubbly así como de flujo bubbly a flujo slug. Estas transiciones fueron propuestas por Sherizawa y Kataoka.

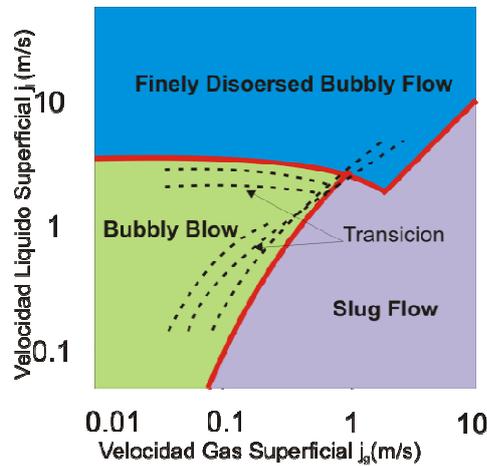


Figura 6.13 Mapa de flujo para un tubo vertical

Taitel establece que la frontera entre los flujos bubbly y slug esta determinada por la expresión:

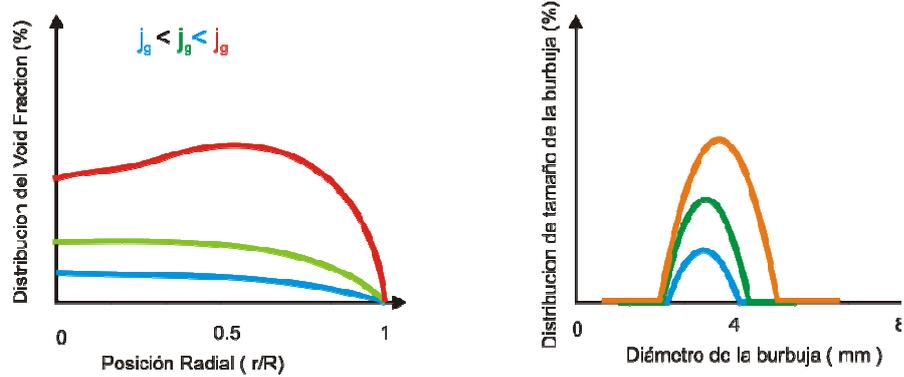
$$j_f = 3j_g - 1.15 \left(\frac{g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right)^{1/4} \quad (6.55)$$

Cuando la velocidad del fluido es superior a 4 m/s y la cantidad de gas no es excesiva las burbujas tienen un diámetro reducido y el perfil radial de fracción de huecos es parecido al régimen en transición entre wall-peak y core-peak, régimen de flujo bubbly finamente disperso. El régimen de bubbly con wall-peak o core-peak es fácilmente identificado debido a la presencia de perfiles característicos de fracción de huecos.

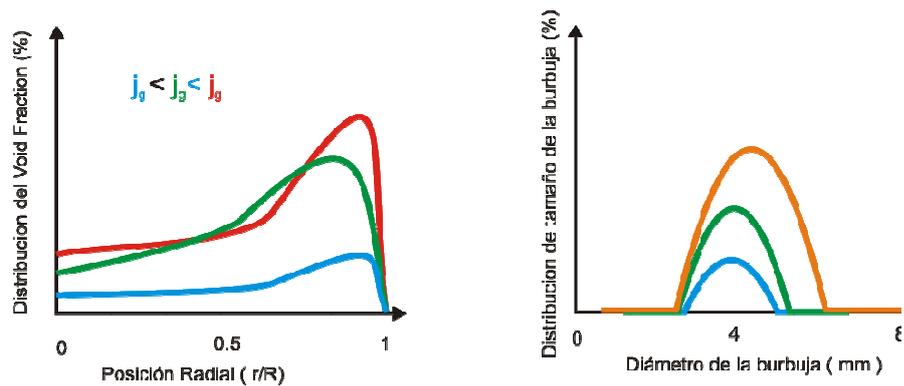
El régimen de transición se distingue del régimen finamente disperso por la presencia de burbujas de mayor tamaño junto a las pequeñas, algo que no ocurre en el primero. El régimen slug es también fácilmente identificable por burbujas cuyo volumen equivalente harían pensar en burbujas de diámetro mayor que el diámetro del tubo, situación imposible de ocurrir. En las siguientes gráficas se muestran perfiles típicos de los distintos regímenes de flujo de forma idealizada y esquemática. En la primera gráfica se muestra el perfil de void fraction para tres velocidades superficiales de gas crecientes. En la segunda gráfica un histograma del tamaño de las burbujas. Las fuerzas que actúan sobre las burbujas o los fenómenos de rotura y coalescencia que intervienen para explicar el

6.3 Desarrollo de flujo aire-agua en tubos verticales

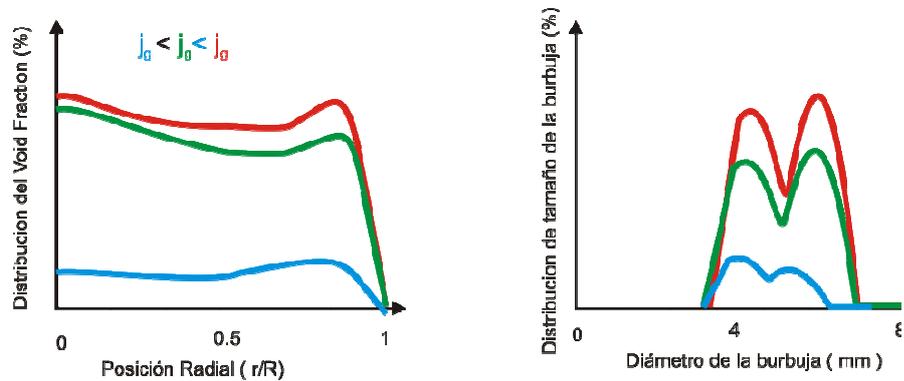
cambio de régimen y la estructura del mismo se verá con detalle a continuación.



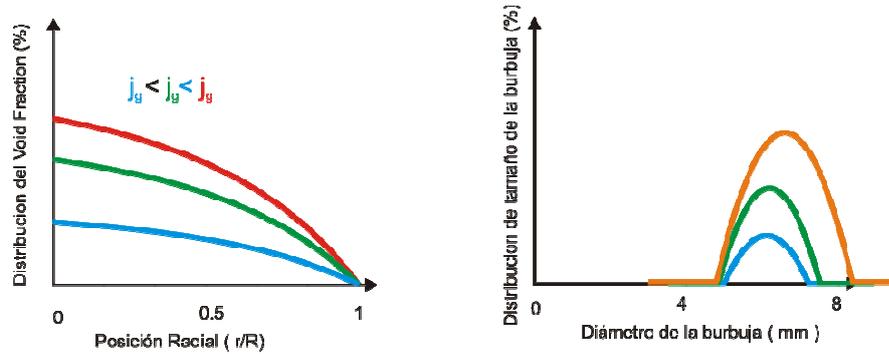
a) Bubbly Flow Finely Dispersed



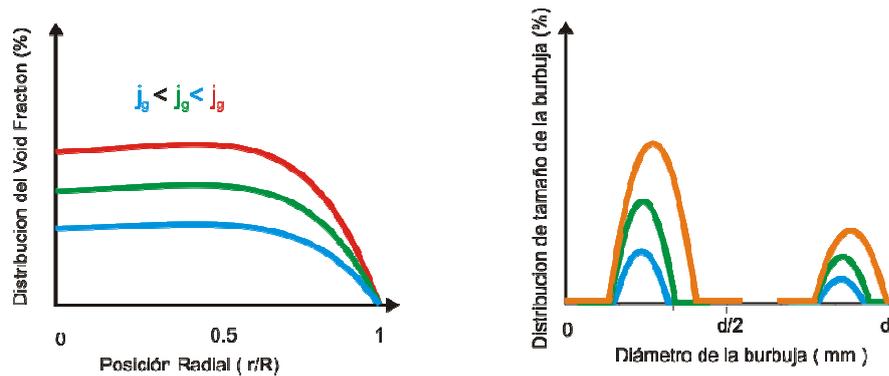
b) Bubbly Flow with wall peak



c) Bubbly Flow in transition region



d) Bubbly Flow with core peak



e) Slug Flow

Figura 6.14 Perfiles radiales de la distribución de fracción de huecos y distribución del tamaño de las burbujas

Cuando las burbujas poseen un tamaño típicamente inferior a los 5 o 6 mm, la lift force empuja a las burbujas hacia la pared produciendo los perfiles típicos de wall peak (figura 6.14.b). Las burbujas en su camino ascendente sufren una despresurización debido al cambio de presión provocando su dilatación y aumento de tamaño, pero esto en el mejor de los casos para un tubo de 4 m influiría en un aumento del 10%-15%, de modo que la existencia de burbujas de mayor tamaño hace pensar que existen fenómenos de coalescencia generando burbujas de tamaño superior a los 5-6 mm que migran hacia el centro, provocando el cambio de régimen.

6.3 Desarrollo de flujo aire-agua en tubos verticales

En el régimen en transición coexisten burbujas de ambos tamaños como se puede ver la figura 6.14.c , podría decirse que existen dos perfiles superpuestos, uno debido a las burbujas originales que siguen su evolución normal situadas en su mayoría cerca de la pared, y otro debido a burbujas creadas a través de la coalescencia que migrarán hacia el centro . Incluso en casos de densa población de burbujas existe una rápida transferencia de las burbujas de mayor tamaño hacia el centro y de las de menor tamaño hacia la pared. En el régimen *core peak* la mayoría de las burbujas ya tienen un tamaño superior al razón por lo cual el histograma se ve desplazado (figura 6.14.d) y el perfil queda marcado con una forma parabólica. Si se sigue incrementando la fracción de gas se llega al régimen slug (figura 6.14.e). La transición entre bubbly y slug es un tema muy complejo y sigue sin estar completamente resuelta, Lucas [Lucas2005] apunta a que más que del aumento de la cantidad de gas, la transición se ve mayormente influenciada por el tamaño de las burbujas.

Pero, como ya se ha comentado, en un mismo flujo pueden existir una amplia gama de burbujas de diferentes tamaños debido o bien a la participación desde el inicio de las mismas o a los fenómenos de rotura y coalescencia. Prasser [Prasser2007] utilizando un wire mesh midió de forma detallada el perfil de void fraction en función del tamaño de las burbujas para el caso de un tubo DN200 y con velocidades superficiales de líquido y gas de 1.0 m/s y 0.22 m/s respectivamente. Aunque aparentemente el perfil tendría una característica de flujo en transición, se observaron que las burbujas de tamaños menores de 5- 6 mm seguían constituyendo perfiles de wall-peak, y eran las de mayor tamaño las que acentuaban su presencia por el centro del tubo, como se puede apreciar en la figura x. Se puede decir que la migración de las burbujas debidas a las fuerzas que sobre ellas actúan es un proceso rápido que alcanza el equilibrio en zonas del flujo, sobre todo cuando está desarrollado, en cambio el fenómeno del break-up y la coalescencia es un fenómeno que sólo mantiene el equilibrio en algunas zonas de flujo muy estable y desarrollado, sobre todo en las partes altas del tubo. Como se puede intuir existe un movimiento constante en las burbujas. Ya que las grandes burbujas migran al centro, las cuales se pueden romper, o crear nuevas de mayor tamaño, y en ambos procesos pueden crear además burbujas de menor tamaño. Estas a su vez pueden migran hacia las paredes, donde chocarán con las que allí existen en un proceso que podría volver a crear burbujas de mayor tamaño que volverían a migrar hacia el centro. Como se ve, se trata de fenómenos complejos que no pueden ser aislados del entorno en el que se desarrolla el experimento, y que por tanto es muy complicado de generalizar.

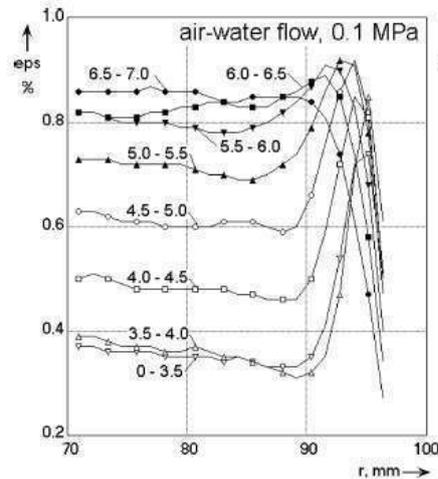


Figura 6.15 Descomposición en función del tamaño de las burbujas para un tubo DN200 con $j_l = 1$ m/s y $J_g = 0.22$ m/s en $L/D=40$. [Prasser2007]

6.4 Análisis de los resultados obtenidos

6.4.1 Ensayos F

Con la realización de los experimentos F se buscó analizar la estructura del flujo bifásico. Se analizó un rango de velocidades usual en la industria nuclear, con una concentración de gas que alcanza hasta los primeros indicios de burbujas slug. Esto se hizo así debido a que en la transición bubbly - slug la estructura es muy compleja y aún no resulta claro que pueda analizarse con sondas de conductividad con suficiente precisión.

En la Gráfica 5.5 del capítulo 5 se puede ver como evoluciona la distribución radial de void fraction para una velocidad del líquido de 0.5 m/s. Inicialmente debido a la baja velocidad y baja concentración de gas se establece una distribución wall peak típica en estos casos en los que la dimensión de las burbujas es pequeña como se puede ver en la gráfica 5.6 (a,b y c). La lift force empuja las burbujas contra las paredes, la cual es repelida por la lubrication force creando el típico pico junto a las paredes, el cual suele estar a muy pocos diámetros de burbuja de la propia pared. Cerca de la pared suele aparecer una película de fluido que repele a las burbujas, en esta zona las sondas suelen tener problemas de medida.

6.4 Análisis de los resultados obtenidos

En estos casos tanto el perfil de diámetros de las burbujas como el de velocidades interfaciales (gráfica 5.5 d,c y f)son muy planos, y por lo tanto los perfiles de la distribución de área interfacial son similares. (Gráfica 5.5.g, h, i). Esta estructura se mantiene hasta prácticamente 20% de fracción e huecos. En cuanto a la velocidad del líquido (graficas 5.6.g y h) se puede apreciar que el perfil de velocidades del fluido se vuelve mucho mas plano debido a la inyección de gas provocando una disminución en las velocidades del fluido en el centro de la tubería. Esta disminución se produce incluso con pequeñas cantidades de gas, incluso menores a 5%. En cuanto a la turbulencia se observa en la grafica 5.6.h que la inyección de burbujas incrementa la turbulencia del fluido o pseudo-turbulencia que es atribuible a la agitación producida por la fase gaseosa. Como se puede ver el aumento de la turbulencia es similar al de la fase gaseosa inyectada.

A partir del 20% de fracción de huecos aparecen perfiles típicos de *core peak*, en el que comienzan a aparecer burbujas de mayor tamaño y el coeficiente de la *lift force* cambia el signo, seguramente debido a la deformación de la burbuja que provoca un cambio en la estructura de la cola, empujando a las burbujas hacia el centro (gráfica 5.5.a, b, c). Las burbujas poseen diámetros elevados, superiores a 5 mm en la mayoría de los casos, que como se comentó suele ser el límite a partir del cual la lift force cambia de signo. En esta velocidad (0.5 m/s) no se aprecian cambios por break-up o coalescencia y el número de burbujas se mantiene más o menos constante (Gráfica 5.6, d, e y f). Se ve como el cambio de estructura tiene un efecto enorme en el resto de parámetros, por ejemplo en la velocidad del líquido o del aire se produce un cambio sustancial con distribuciones mucho mas parabólicas (Gráficas 5.5.d, e, f y Gráfica 5.6.g). En cuanto a la turbulencia se aprecia también que la agitación aumenta mucho en esta nueva estructura del flujo produciendo que la intensidad de turbulencia aumente (Gráfica 5.6.h) viéndose un cambio importante de la distribución *wall peak* a *core peak*.

Para el caso de 1 m/s deben mencionarse cosas específicas, por ejemplo aparecen algunos perfiles en transición entre el wall y el core peak, como es el caso del gas F02G04 en la gráfica 5.7.a, b y c. Este tipo de perfil es común cuando coexisten burbujas de varios tamaños alrededor del diámetro crítico de cambio de régimen. Otro dato a destacar es la intensidad de turbulencia, gráfica 5.8.h: la mayor presencia de burbujas produce una mayor agitación y por lo tanto mayor intensidad de la turbulencia. Pero esto no siempre es así, como ya reportaron otros autores es posible que la inyección de una cantidad pequeña de burbujas disminuyan la turbulencia, como se ve junto a la pared para los casos F02G02 y F03G03.

Esto es debido a que las burbujas tienden a aplanar el perfil de velocidades, lo que puede reducir el gradiente de velocidades junto a la pared, y por tanto la turbulencia asociada. Este fenómeno no ocurre siempre y ha de combinar un gradiente de velocidades suficiente con una cantidad de gas que los compense, y es a partir de 1 m/s cuando esto suele ocurrir (por ejemplo en el caso de 0.5 m/s gráfica 5.6.h esto no ocurría).

Cuando la velocidad es igual o superior a 2 m/s los fenómenos de break-up y sobre todo la coalescencia ya empiezan a tener relevancia, y son muchos los autores que consideran esta velocidad como el límite a partir del cual estos mecanismos cobran importancia. El comportamiento de la distribución de void fraction en la parte baja de la columna llama la atención, gráfica 5.9 a, en el sentido de que aparentemente no existe ya wall-peak, y aparecen perfiles en transición o perfiles típicos de regímenes con burbujas muy pequeñas. Esto se podría interpretar de otra manera ya que se debe al efecto de la entrada en la sección de media desde la cámara de mezcla y no al efecto de las burbujas, es decir, esta distribución está altamente influenciada por la hidrodinámica del sistema. Como se puede ver en la posición axial $z/D = 36$, gráfica 5.9.b, los perfiles son muy distintos cuando la longitud de entrada al tubo ha sido superada.

Como ya ocurría en el caso de 1 m/s se ve como la inclusión de burbujas ya no tiene el efecto de aplanado del perfil de velocidades (Gráfica 5.10.g) que ocurría en el caso de 0.5 m/s. Ya que la parte hidrodinámica que provoca el gradiente de velocidades es muy importante y supera el efecto de aplanado de las burbujas.

Como se puede ver en las gráficas 5.10 a, b y c el tamaño de las burbujas varía ya considerablemente en las tres posiciones axiales, aumentando el tamaño medio de las burbujas. Esto es debido a dos causas, en primer lugar existe una mayor caída de presión debido a las pérdidas por fricción en la sección lo que provoca un efecto de descompresión mayor en las burbujas y se aprecia un cambio mayor en su tamaño. Por otro lado, como se puede ver en las gráficas 5.10 d, e y f, existe una ligera disminución del número de burbujas que hace pensar en la aparición de una componente de coalescencia en las burbujas que redundará en el aumento del tamaño de las mismas. Para velocidades de fase líquida de 2 m/s la desintegración de burbujas aún no se considera en exceso importante para este tamaño de burbujas.

En cuanto a la concentración de área interfacial se aprecia que al igual que en los otros casos, si la distribución de diámetros es plana el perfil de la concentración de área interfacial se asemeja al comportamiento de la fracción de huecos.

6.4 Análisis de los resultados obtenidos

Debe señalarse que cuando las burbujas tienen un tamaño mayor, la concentración de área interfacial disminuye, el perfil se vuelve plano aún cuando la distribución de void fraction tiene una marcada forma core-peak, indicativo de burbujas de mayor tamaño en el centro de la sección, Gráfica 5.9 h, i.

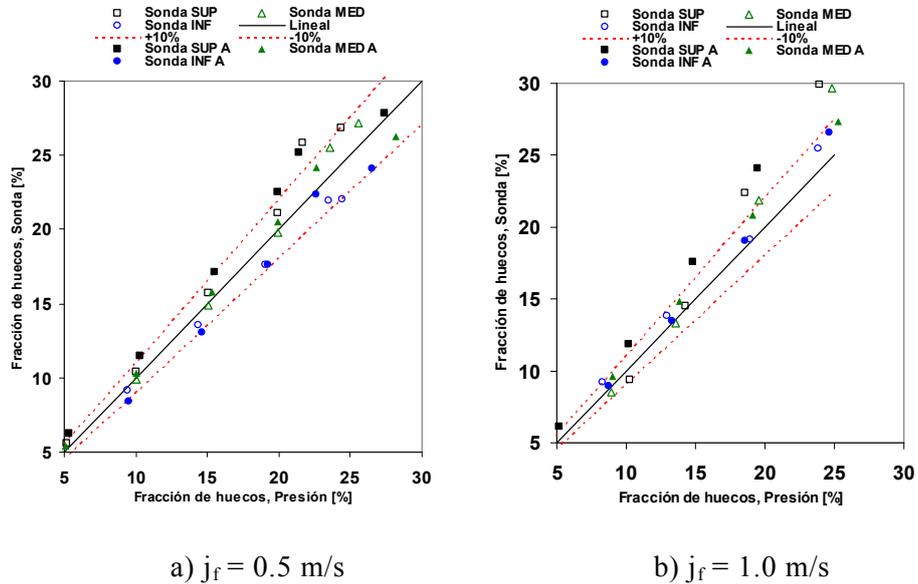
A partir de velocidades superiores a 2 m/s, la estructura es muy similar, pero con rasgos más acentuados. En estos casos (Gráfica 5.11 a, b y c y Gráfica 5.13 a, b y c) ya no existe distribución wall-peak en ningún caso, sino que se establecen perfiles en transición y core-peak. Aquí la lubrication force tiene poca importancia, y el arrastre debido a los grandes perfiles que se establecen hace que la interpretación de los fenómenos que allí ocurren sea más difícil. Fenómenos como el break-up y la coalescencia son ahora más importantes.

Lamentablemente para estas velocidades, las sondas, se vuelven muy imprecisas y los resultados obtenidos necesitan de una mayor labor de procesado para hacer una buena interpretación de los fenómenos físicos que allí ocurren. Se podría decir que en estos casos sólo podemos, de momento, ofrecer resultados e interpretar las tendencias, pero no sería posible un análisis como en los casos precedentes.

De forma general, podemos decir que a partir de los 2 m/s las tendencias y perfiles se mantienen con una estructura constante. Los picos de pared desaparecen, con lo que cerca de la pared ya no es necesaria una medida muy detallada, como ocurre en secciones de medida con tamaños mayores, por ejemplo DN200. Existen pocos cambios en las estructuras a medida que aumentamos el gas, y las evoluciones son poco bruscas, siempre hablando de regímenes en los que las burbujas cup aún no son numerosas, es decir en el inicio de la transición a slug.

a) Efecto de la geometría de la sonda

Los resultados obtenidos con ambos modelos de sonda son comparados con los valores de velocidades de fase gaseosa, velocidades de fase líquida y fracción de huecos medidos con la instrumentación instalada en la sección de medida (medidores de caudal, presión y anemometría láser). Como primer análisis, las medidas de fracción de huecos obtenidas con la sonda de conductividad, y los medidores de presión instalados en la columna, son comparados, para las condiciones de velocidad de fase líquida de 0.5 m/s y 1.0 m/s.



Gráfica 6.5 Fracción de huecos medida con sondas y manómetros

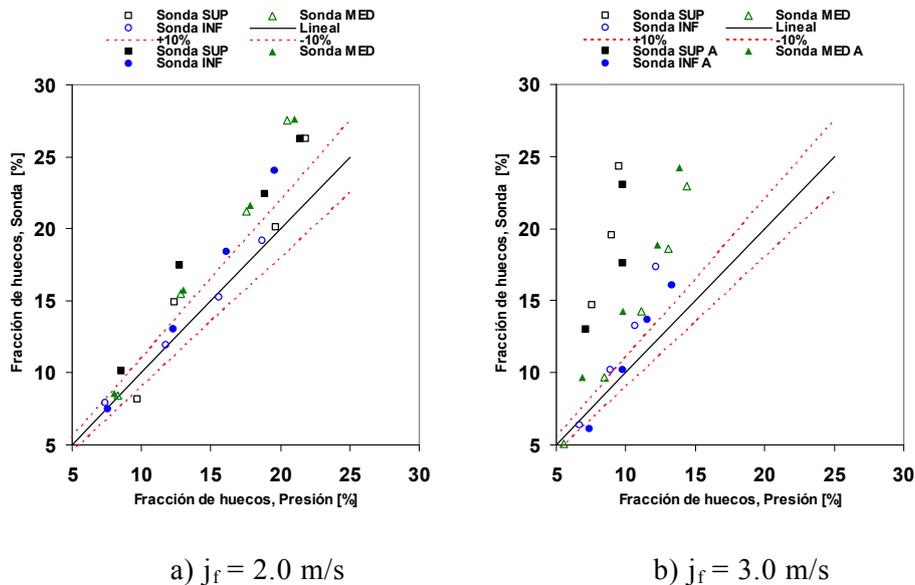
En la gráfica 6.5 se observa la fracción de huecos medida con la sonda de conductividad y el medidor de presión. Se observa que en general a bajas fracciones de huecos ambas geometrías aportan medidas similares y se encuentran dentro de un 10% de desviación. Las sondas instaladas en el puerto superior (Sonda SUP y Sonda SUP A, en la gráfica 6.5) poseen una desviación mayor al 10% para fracciones de huecos de 20 y 25%, para valores superiores los medidores de presión no proporcionan una medida fiable y los valores que se obtienen de la adquisición de datos presentan oscilaciones, en estas condiciones coexisten burbujas esféricas y caps las cuales generan a su paso oscilaciones en la fase líquida que altera la medida del sensor.

En las condiciones de alta velocidad de fase líquida se observa que los valores de la fracción de huecos son mucho menores que los medidos con la sonda de conductividad, especialmente para la condición de 3.0m/s, gráfica 6.6.d. Entonces, estimar una medida de la fracción de huecos a partir de la medida de la presión no es recomendable para altas velocidades superficiales de la fase líquida debido a que los medidores de presión manométrica no proporcionan una medida fiable, ello en parte ocasionado por la naturaleza de funcionamiento del medidor ya que responde muy bien ante la componente estática de la presión, pero no así a la componente dinámica. Aparte de las razones técnicas de medida, para el paso de

6.4 Análisis de los resultados obtenidos

bubbly a otros regímenes, la caída de presión deja de ser lineal y ya no puede hacerse una comparación directa con la reducción de presión por aumento de la fase gas, lo que dificulta la medida de gas por la simple medida de la presión.

Por estas razones en la gráfica 6.6 se observa que la estimación de la fracción de huecos es muy diferente a la medida obtenida a partir de la sonda de conductividad que empleando la medida de presión. Por lo tanto a velocidades de fase líquida de hasta 2 m/s, la estimación de la fracción de huecos empleando la medida de la presión manométrica es confiable salvo casos con fracciones de gas muy elevadas, no así para velocidades mayores a 2 m/s que se ha de desaconsejar este tipo de calibración salvo para casos de fracciones de huecos muy bajas..

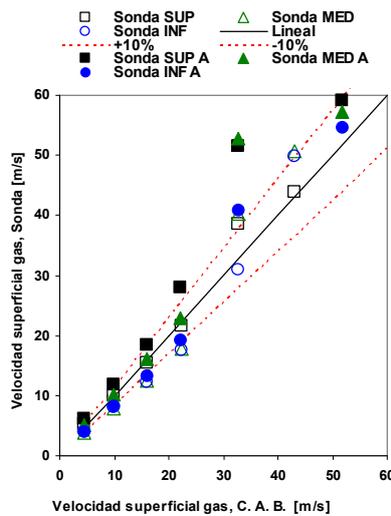


Gráfica 6.6 Fracción de huecos medida con sondas y manómetros

Desafortunadamente no fueron adquiridas durante estos experimentos imágenes digitales por lo que no es posible comparar las medidas efectuadas con la sonda respecto a imágenes digitales. No obstante en ensayos posteriores (ensayos B-E) se empleó el sistema de visión artificial conjuntamente con el sistema LDA y la sonda de conductividad, y nos permitió corroborar parte de estos resultados.

Capítulo 6. Análisis

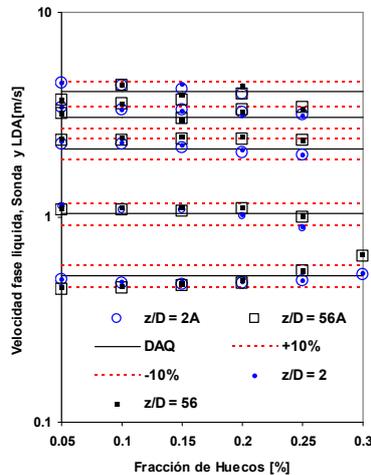
La gráfica 6.7 muestra la comparación de la velocidad de fase gaseosa proporcionada por el medidor de caudal de aire y la estimada a partir del uso de la sonda de conductividad. Se observa que dentro de 10% de error los valores de velocidad son similares. Solo en algunos casos puntuales la desviación es superior al 10%, estos casos corresponden a regímenes en transición.



Gráfica 6.7 $j_f = 0.5$ m/s

La velocidad superficial de fase líquida obtenida a partir del medidor de caudal electromagnético es comparada con la obtenida a partir del perfil de velocidades mediante el uso del sistema de anemometría Láser y la fracción de huecos medida con la sonda de conductividad. La gráfica 6.8 muestra dicha comparación, en ella se observan valores indicados como DAQ que representan los valores promedio de la velocidad superficial de la fase líquida a partir de la medida del caudalímetro electromagnético. Se han dibujado líneas de color rojo que representan los límites inferiores y superiores del 10% de desviación. Se observa que los valores de velocidad superficial obtenidos con la sonda y el sistema LDA se encuentran en la mayoría de los casos dentro de un 10% de error respecto al valor medido con el caudalímetro.

6.4 Análisis de los resultados obtenidos



Gráfica 6.8 Velocidad de fase media: Sonda y LDA vs Caudalímetro

Cuando hay fracciones de huecos altas el sistema de anemometría láser no brinda una medida fiable de la velocidad local debido a que las condiciones ópticas dentro del flujo bifásico no son las óptimas. En general podemos decir que no se aprecian variaciones considerables en cuanto a la utilización de uno u otro modelo de sonda.

Se han comparado resultados preliminares con otras fuentes de información y se ha visto que los resultados se encuentran dentro de una desviación aceptable respecto a dichas fuentes. Los párrafos anteriores nos indican que no existen diferencias significativas entre ambas configuraciones de la sonda, de hecho se aprecia que ambas técnicas proporcionan información congruente con la aportada con otras técnicas de medida. Este tipo de comprobación cruzada de los datos del caudalímetro con los datos proporcionados por la sonda y el LDA resultan muy valiosos para comprobar la fiabilidad de todo el sistema, que como se ve resulta bastante preciso.

6.4.2 Ensayos B-E

Los experimentos se plantean básicamente como un ejercicio para comprobar si las sondas eran capaces de detectar y medir burbujas de tamaño menor, y también como una forma de analizar cómo influye la tensión superficial en la estructura del flujo bifásico.

Durante la ejecución de los experimentos se tuvieron muchos problemas a la hora de analizar las mezclas que reducían la tensión superficial.

Capítulo 6. Análisis

Las mezclas realizadas en un laboratorio por agitación proporcionaban disminuciones considerables de la tensión superficial siendo totalmente misibles y homogéneas. Pero el uso del un sparger como unidad de generación de burbujas provocó que pequeñas cantidades de butanol provocasen una mezcla espumosa de burbuja indetectables por las sondas y tan opacas que no era posible el uso de LDA. Por tanto, al final se optó por inyectar una cantidad pequeña de butanol que disminuyese hasta 10% (de 72 a 65 N/m) la tensión superficial, caso D. Debido a la posible contaminación del butanol se limpió la instalación y se repitió el experimento base, llamado B, sin añadir butanol.

En general en el uso moderado del butanol, produce un cambio en la tensión superficial, cuyo primer efecto es la reducción del tamaño del las burbujas. Los números adimensionales de Eötvos y Morton se ven afectados por esta reducción, pero para cambios tan pequeños es muy difícil decidir su influencia, ya que dependen de la reducción efectiva del diámetro para calibrar su el rango de variación. En general para estos casos existe un cambio moderado en el número de Eötvos que disminuye y un aumento, también moderado, del número de Morton, por lo que las fuerzas que actúan sobre las burbujas se ven poco influenciadas , y sólo el cambio de diámetro afecta al valor final de las mismas.

Como se puede ver en las gráficas 5.18, 5.20 y 5.22 a, b y c existe una disminución efectiva del diámetro de las burbujas que puede llegar a ser hasta del 50% en algunos casos. Las sondas son capaces de detectar y medir burbujas de apenas 1 mm con éxito, y extraer información de ellas de forma eficaz.

En general para velocidades de fase líquida de 0.5, 1 y 2 m/s se puede apreciar la disminución del tamaño de las burbujas, y como los perfiles son muy similares a los anteriores. El caso d 2 m/s es muy interesante porque en los casos de baja fracción de huecos ambos experimentos coinciden muy bien en la cantidad de gas inyectada, lo que nos permite ver que el perfil de IAC, gráfica 5.21 g, h e i, cuando las burbujas son de menor tamaño la concentración de área interfacial aumenta, como cabe esperar, y las sondas y la metodología utilizada es capaz de detectarlo.

En general es difícil extraer conclusiones de estos experimentos en cuanto al efecto de una reducción del tamaño de las burbujas porque se trata de tamaños muy similares. Sería necesaria una reducción mayor para poder apreciar con claridad los efectos de la reducción de la tensión superficial.

6.4 Análisis de los resultados obtenidos

Aún así se puede extraer como conclusión que la solidez del sistema de media ofrece resultados muy repetibles, fiables, incluso en una reducción del tamaño de las burbujas. El sistema de media cumple con las expectativas para las que fue creada.

6.4.3 Ensayos A

La familia de perfiles obtenidos en estos ensayos revela información interesante en cuanto al desarrollo de la distribución de fases especialmente en posiciones cercanas a la pared. Los resultados por el momento serán solamente analizados cualitativamente, ya se preparan trabajos en los cuales se explote al máximo la información generada.

En la figura siguiente se observan los perfiles de fracción de huecos para los ensayos A, las velocidades de fase líquida son respectivamente 0.5, 1, 2 y 3 m/s. Han sido representados con puntos aquellos perfiles que corresponden sin lugar a dudas a flujo bubbly, mientras que los datos representados con líneas indican la aparición de burbujas caps. Se observa en la figura 6.9.c la evolución nítida y clara del perfil de void fraction a partir de perfiles propios de régimen bubbly finamente disperso a un régimen en transición.

Los picos máximos que se observan en las velocidades de 1 y 2 m/s de fase líquida son grandes comparados con los correspondientes a la velocidad de 0.5 m/s indican una mayor densidad poblacional de burbujas.

En cambio en la gráfica 6.9.d se observa que no existe ya wall Peak ello debido a la aparición de fenómenos de interacciones entre burbujas cada vez más importantes. Cuando la velocidad es igual o superior a 2 m/s los fenómenos de break-up y sobre todo la coalescencia ya empiezan a tener relevancia, es por ello que perfiles wall-peak son reducidos o nulos apareciendo en cambio perfiles en transición o perfiles típicos de regímenes con burbujas pequeñas.

El efecto de las condiciones de entrada en la sección de media desde la cámara de mezcla esta determinada enormemente por la hidrodinámica del sistema a velocidades superiores 3 m/s.

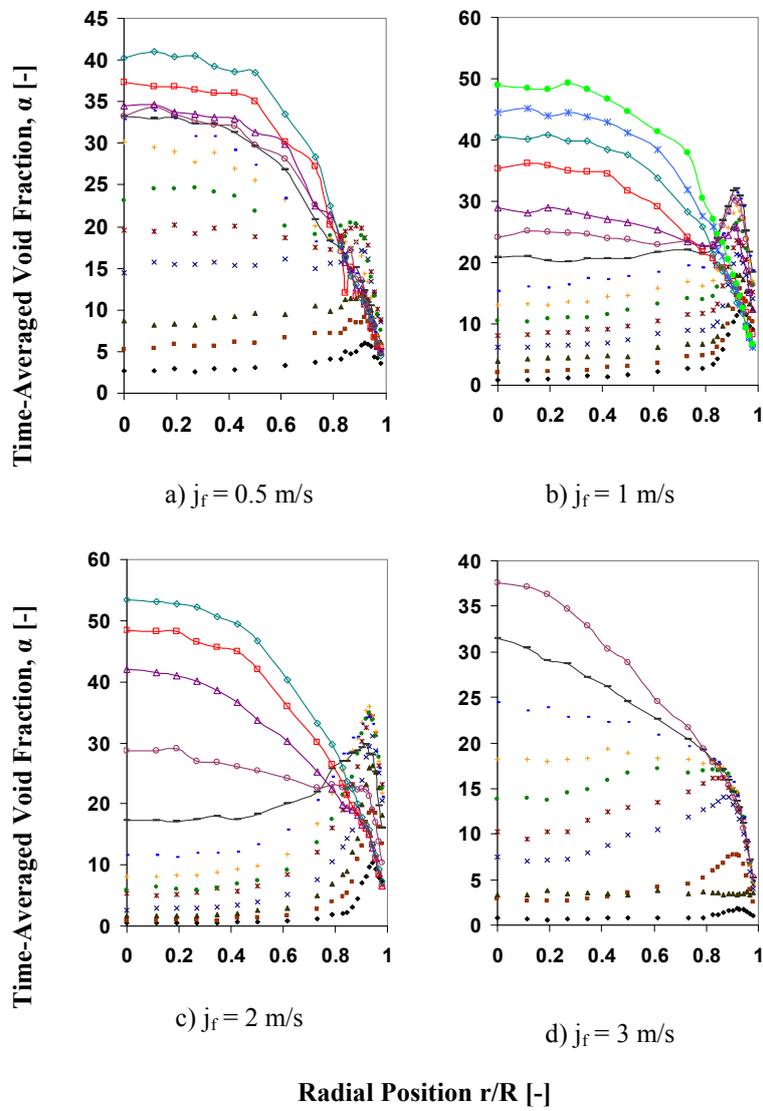


Figura 6.9 Fracción de huecos ensayos A

6.5 Nomenclatura

C_{mv}	Coefficiente de masa virtual
C_{wd}	coeficiente damping
C_{wc}	coeficiente cut-off

6.6 Referencias

C_D	Coefficiente Drag
C_L	Coefficiente lift
d_p	Diámetro de partícula
d_h	Máxima dimensión horizontal de la burbuja
d_b	Diámetro de burbuja
d_0	Dímetro de burbuja
D_{eq}	Diámetro equivalente
E_0	Numero de Etvös
E_{or}	Mean Aspect Ratio
F	Fuerza
F_D	Drag Force
g	Aceleración gravitacional
k_l	Energía cinética turbulenta
M_0	Numero de Morton
M_f	Masa virtual o masa de fluido
\hat{n}_w	Dirección normal a la pared
$Re_{Burbuja}$	Numero de Reynolds de burbuja
r	Fracción de volumen
w_{rel}	Velocidad relativa entre fases
y_w	Distancia a la pared
U	Velocidad
U_T	Velocidad terminal
ω	Magnitud del gradiente de velocidades
\forall_b	Volumen ocupado por la burbuja
ξ	factor de modificación debido a deformación

Subíndices

α	Fase líquida
β	Fase gaseosa
c	Fase continua
d	Fase discreta
σ	Tensión superficial agua
re	relativa
DT	Dispersión turbulenta

6.6 Referencias

[Antal1991]. Antal, S.P., Lahey, R.T., Flaherty, J.E. Analysis of Phase Distribution in Fully Developed Laminar Bubbly Two-Phase Flow. Int. Journal of Multiphase Flow. 17 (1991) 635-652.

[Auton1987]. Auton, T.R. The lift force on a spherical body in a rotational flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 183 (1987) 199–218.

[Bertodano1998]. Bertodano, L. Two fluid model for two-phase turbulent jets. *Nuclear Engineering and Design*. 179 (1998) 65–74.

[Burns2004]. Burns, A.D., Frank, T., Hamill, I., Shi, J.-M. The Favre averaged drag model for turbulence dispersion in Eulerian multi-phase flows. *Fifth International Conference on Multiphase Flow. ICMF (2004) Yokohama, Japan*. 392.

[Carrica1999]. Carrica, P.M., Drew, D.A., Lahey, R.T., A polydisperse model for bubbly two-phase flow around a surface ship. *International Journal of Multiphase Flow*. 25 (1999) 257–305.

[Descamps2008]. Descamps M.N., Oliemans R.V.A., Ooms G., Mudde R.F. Air-Water Flow in a Vertical Pipe: Experimental Study of Air Bubble in the Vicinity of the Wall. *Experiments in Fluids*. 45 (2008) 357-379.

[Drew1987]. Drew, D.A., Lahey Jr., R.T. The virtual mass and lift force on a sphere in rotating and straining inviscid flow. *International Journal of Multiphase Flow*. 13 (1987) 113–121.

[Drew2001]. Drew, D.A. A turbulent dispersion model for particles or bubbles. *Journal of Engineering Mathematics*. 41 (2001) 259–274.

[Ervin1997]. Ervin, E.A., Tryggvason, G. The rise of bubbles in a vertical shear flow. *Journal of Fluids Engineering*. 119 (1997) 443–449.

[Felton2001]. Felton, K., Loth, E. Spherical bubble motion in a turbulent boundary layer. *Physics of Fluids*. 13 (2001) 2564–2577.

[Frank2005]. Frank Th. Advances in Computational Fluid Dynamics (CFD) of 3-dimensional gas-liquid Multiphase Flow. *NAFEMS Seminar Simulation of Complex Flow (CFD), Wiesbaden, Alemania, (2005) 1-18*.

[Gosman1992]. Gosman, A.D., Lekakou, C., Politis, S., Issa, R.I., Looney, M.K. Multidimensional modeling of turbulent two-phase flow in stirred vessels. *A.I.Ch.E.* 38 (1992) 1946–1956.

[Hibiki1999]. Hibiki, T., Ishii, M. Experimental study on interfacial area transport in bubbly two-phase flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 42 (1999) 3019–3035.

[Hibiki2001]. Hibiki, T., Ishii, M., Xiao, Z. Axial interfacial area transport of vertical bubbly flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44, pp. 1869–1888, 2001.

6.6 Referencias

[Hibiki2003]. Hibiki, T., Situ, R., Mi, Y., Ishii, M. Local flow measurements of vertical upward bubbly flow in an annulus. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, pp. 1479–1496. , 2003

[Hibiki2007]. Hibiki T., Ishii M. Lift force in bubbly flow systems. *Chemical Engineering Science*. 62 (2007) 6457 – 6474.

[Krepper2005]. Krepper, E., Lucas, D., Prasser, H.-M. On the modelling of bubbly flow in vertical pipes. *Nucl. Eng. Des.* 235 (2005) 597–611.

[Krepper2008]. Krepper E., Lucas D., Frank T., Prasser HM., Zwart PJ. The inhomogeneous MUSIG model for the simulation of polydispersed flows. *Nuclear Engineering and Design*, 238, Issue 7, pp 1690-1702, 2008

[Lahey1993]. Lahey, R.T., Lopez de Bertodano, M., Jones, O.C. Phase distribution in complex geometry conduits. *Nuclear Engineering and Design* 141 (1993) 177–201.

[Liu1993]. Liu, T.J. Bubble size and entrance length effects on void development in a vertical channel. *International Journal of Multiphase Flow*. 19 (1993) 99–113.

[Lucas2004]. Lucas, D., Shi, J.-M., Krepper, E., Prasser, H.-M. Models for the forces acting on bubbles in comparison with experimental data for vertical pipe flow. *Third International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*, Pisa, Italia, pp 22–24, 2004

[Lucas2005]. Lucas, D., Krepper, E. Prasser, H.-M.. Development of co-current airwaterflow in a vertical pipe. *International Journal of Multiphase Flow*. 31 (2005) 1304–1328.

[Mougin02]. Mougin, G., Magnaudet J. The generalized Kirchoff Equations and their Application to the Interaction between a Rigid Body and an Arbitrary Time-Dependent Viscous Flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 28, pp 1837-1851, 2002

[Moraga1999]. F. J. Moraga, F. J. Bonetto, R. T. Lahey. Lateral forces on spheres in turbulent uniform shear flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 25, Issues 6-7, 11, pp 1321-1372, 1999

[Moraga2001]. Moraga J.P., Larreteguy A.E., Drew D.A., Lahey R.T. Assessment of Turbulent Dispersion Models for Bubbly Flow. *International Conference in Multiphase Flow , ICMF 2001*, 2001

[Moraga2003] Moraga, F.J., Larreteguy, A.E., Drew, D.A., Lahey, R.T. Assessment of turbulent dispersion models for bubbly flows in the low Stokes number limit. *International Journal of Multiphase Flow* 29, pp 655–673., 2003.

[Mikielewickz07]. Mikielewickz d., Wajs J. A model of bubble motion in the vicinity of the wall. 6th International Conference on Multiphase Flow, ICMF2007, Alemania, 2007

[Moursali1995]. Moursali, E., Marie, J.L., Bataille, J. An upward turbulent bubbly boundary layer along a vertical flat plate. *International Journal of Multiphase Flow* 21, pp.107–117. 1995

[Prasser2002]. Prasser, H.-M., Krepper, E., Lucas, D. Evolution of the two-phase flow in a vertical tube-decomposition of gas fraction profiles according to bubble size classes using wire-mesh sensors. *International Journal of Thermal Science*. 41 (2002) 17–28.

[Prasser2005]. Prasser, H.-M., Beyer, M., Böttger, A., Carl, H., Lucas, D., Schaffrath, A., Schütz, P., Weiss, F.-P., Zschau, J. Influence of the pipe diameter on the structure of the gas–liquid interface in a vertical two-phase pipe flow. *Nuclear Technology*. 152 (2005) 3–22.

[Serizawa1975]. Serizawa, A., Kataoka, I., Michiyosi, I. Turbulence structure of airwater flows: parts 1–3. *International Journal of Multiphase Flow*. 21 (1975) 221–259. 1975

[Serzawa1988]. Serizawa, A., Kataoka, I. Phase Distribution in Two-phase Flow. *Transient Phenomena in Multiphase Flow*. Hemisphere, Washington, DC. pp. pp. 179–224. 1988.

[Serizawa1994]. Serizawa, A., Kataoka, I. Dispersed flow I. *Multiphase Science and Technology*, vol. 8. Begell House Inc., New York. pp. 125–194, 1994.

[Tomiyaama1995]. Tomiyama A., Sou, A., Zun, I., Kanami, N., Sakaguchi, T. Effects of Eötvös number and dimensionless liquid volumetric flux on lateral motion of a bubble in a laminar duct flow. *Advances in Multiphase Flow*. (1995) 3–15.

[Tomiyaama98]. Tomiyama A. Struggle with Computational Bubble Dynamics. *Proceeding of the Third International Conference on Multiphase Flow, ICMF98, Lyon, Francia, 1998*

[Tomiyaama2002]. Tomiyama, A., Tamai, H., Zun, I., Hosokawa, S.,. “Transverse migration of single bubbles in simple shear flows”. *Chemical Engineering Science*. 57 (2002) 1849–1858.

6.6 Referencias

[Tomiya2004]. Tomiyama A. Drag, Lift and Virtual Mass Forces Acting on a Single Bubble. 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, 2004

[Wans1987]. Wang, S.K., Lee, S.J., Jones, O.C., Lahey Jr., R.T. 3-D turbulence structure and phase distribution measurements in bubbly two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*. 13 (1987) 327–343.

[Zaruba07]. Zaruba A., Lucas D., Prasser H., Höhne T. Bubble-wall interactions in a vertical gas–liquid flow: Bouncing, sliding and bubble deformations. *Chemical Engineering Science*. 62 (2007) 1591 – 1605.

[Zun1988]. Žun, I. Transition from wall void peaking to core void peaking in turbulent bubbly flow. *Transient Phenomena in Multiphase Flow*. Hemisphere, Washington, DC. (1998) 225–245.

Capítulo 7. Conclusiones

7.1 Conclusiones Generales.....	VII - 1
7.2 Trabajos Futuros.....	VII - 4

7.1 Conclusiones Generales

El esfuerzo por comprender la naturaleza del flujo bifásico no es suficiente con el modelado teórico del mismo, es necesario una referencia experimental, en este sentido ésta tesis expone que la sonda de conductividad, la instalación experimental PUMA y la incorporación de un completo sistema instrumentación permiten la obtención de información experimental confiable y de utilidad en la validación de modelos teóricos de sistemas bifásicos. A continuación se exponen a manera de conclusiones los aspectos más importantes de este trabajo.

- El modelo de los Dos Fluidos es por el momento la mejor alternativa en cuanto al modelado de flujo bifásico, ello debido a que considera los fenómenos de transporte de masa, momento y energía para cada fase y entre fases. Sin embargo éste modelo no está totalmente desarrollado ya requiere de ecuaciones de cierre que incluyan información acerca de la concentración de área interfacial. Una propuesta para solventar este problema es tratar al área interfacial como una variable más de transporte que incluya información acerca de los fenómenos de interacción entre fases. Por otro lado es requerida información experimental que permita validar dicho modelo, en este sentido se ha desarrollado un sistema de medida que permite obtener información acerca de los principales parámetros de flujo bifásico, entre otros la concentración de área interfacial.
- La instalación experimental que se construyó como parte del sistema de medida, ha sido diseñada para obtener sistemas bifásicos agua-aire con diferentes condiciones de flujo que generen regímenes de flujo bubbly y de transición bubbly-slug.
- Se ha observado que el sistema de medida disponible, y en particular la sonda de conductividad, responden fielmente a la naturaleza del flujo proporcionando información detallada de las variables locales que definen la dinámica de dicho flujo
- La instrumentación con la que se ha dotado a la instalación experimental incluye medidores de caudal, medidores de presión, temperatura, adquisición de imagen digital de alta velocidad, un sistema de anemometría láser que permite obtener la distribución de velocidades e intensidad de turbulencia de la fase líquida y sondas de conductividad utilizadas en la medida de perfiles radiales de los principales parámetros de flujo.

- La sonda de conductividad es una técnica de medida que permite la medición de los principales parámetros de flujo locales, que a saber son la fracción de huecos, la velocidad interfacial, el tamaño de burbuja, la distribución del número de burbujas y la concentración de área interfacial. Este último parámetro es clave en el modelado de los sistemas bifásicos líquido-gas pues representa la superficie disponible a través de la cual se suceden la transferencia de masa, momento y energía entre fases.
- Se han desarrollado dos tipos de sondas de conductividad, la diferencia entre ellas radica en una disposición geométrica distinta para cada modelo. Ambos modelos resultan operativas y la información que de su uso se obtiene ha sido contrastada con otras fuentes, se ha observado que la información obtenida por ambas es útil y fiable.
- En cuanto a la configuración geométrica de la sonda de conductividad se ha observado que en general las dos geometrías empleadas en este trabajo aportan la misma información, excepto por un factor que cobra importancia dependiendo del régimen que se desee estudiar. Así por ejemplo ambas configuraciones geométricas pueden ser empleadas en flujos bubbly y flujos en regímenes en transición pero sí se desean analizar las características del flujo en posiciones radiales cercanas a la pared la geometría FOXA aporta información más detallada.
- De la información obtenida se concluye que la sonda de conductividad con un arreglo geométrico FOXA¹ aporta información más detallada acerca de los principales parámetros de flujo en posiciones radiales cercanas a la pared, ello es debido a la distribución de las puntas que permite situar a la sonda en posiciones muy próximas a la pared.
- Por otro lado la sonda de conductividad con arreglo geométrico FOX proporciona información de mejor calidad respecto al modelo FOXA en regímenes de flujo con burbujas relativamente grandes como puede ser flujo en transición y flujo slug y en condiciones en las que los procesos hidrodinámicos en posiciones cercanas a la pared no sean objeto principal de estudio, por ejemplo en altas velocidades de fase líquida.
- La sonda de conductividad fue empleada para obtener información experimental acerca de los parámetros locales de flujo bifásico en cuanto a su evolución axial y su distribución radial. Para ello se analizaron condiciones de flujo propias de regímenes bubbly y el inicio de la transición bubbly-slug.

¹ Definido en la sección 5.2.2 y en la figura 5.4.

Capítulo 7. Conclusiones

- El diseño de la instalación permite la obtención de flujos bifásicos cuya distribución de la fase gaseosa concuerda bien con distribuciones reportadas por otros autores ya que se puede observar perfiles radiales que presentan las mismas características; así, por ejemplo, los característicos picos de pared, *core peak*, distribuciones planas y en transición son observables.
- En los perfiles radiales obtenidos se observa una completa y detallada evolución del pico de pared en los perfiles radiales de la fracción de huecos, el detalle y precisión obtenidos es tal que puede apreciarse una fracción de huecos máxima que representaría las condiciones bajo las cuales comienza la transición de régimen bubbly a slug.
- Se hace presente también la evolución del flujo ante el incremento de velocidad y con ello el estado de esfuerzos viscosos y sobre todo la aparición de fuerzas debidas a la presencia de burbujas. Junto con el sistema LDA se han obtenido los perfiles de velocidad de fase líquida que por sí mismos indican el cambio de un régimen de flujo a otro.
- Los perfiles obtenidos de la concentración de área interfacial muestran la evolución en la dirección de desarrollo de flujo, así por ejemplo se observa que para velocidades relativamente altas, superiores a 2.0 m/s, este desarrollo se acentúa. Esto indica una alta interacción de burbujas a lo largo de esta dirección, como lo corrobora la distribución del número de burbujas presentado.

7.2 Trabajos Futuros

Existen una serie de líneas de trabajo derivados de esta tesis, mismo que se plantean a continuación:

- Mejora del software de procesado de la señal:

Existen todavía muchas deficiencias en el procesado de la señal, sobre todo cuando se analizan flujos en los que aparecen burbujas cups. Será necesario introducir en el algoritmo una mejora que repercuta en la detección de estas burbujas más eficiente y la reconstrucción de su diámetro, velocidad y área interfacial. Además es necesario mejorar el modelo Drift Flux de manera que pueda predecir teóricamente el comportamiento del flujo y ayude a evitar malinterpretaciones del software de procesado.

- Construcción de una nueva instalación experimental

La instalación con la que se desarrollo la tesis ha sido desmantelada. Existen ya planes para la construcción de una nueva con mejores prestaciones como son una mayor altura para la sección de medida e instrumentación de control y adquisición de datos más precisa, además de la posibilidad de variar la sección de medida.

- Mejora del diseño de las sondas

Mejorar el proceso de fabricación de las sondas para que su configuración espacial final sea más repetible, además de una mayor sencillez en su instalación dentro de la sección de medida. Se comienzan a seleccionar nuevos recubrimientos dieléctricos para las puntas de la sonda, como el teflón, ello con la finalidad de fabricar sondas más resistentes y durables. Se ha de investigar nuevos materiales para sondas en casos de altas temperaturas.

-
- Desarrollo de experimentos para estudiar la transición a SLUG

Uno de los límites importantes actuales es la transición bubbly a slug, y el estudio del régimen slug. Para ello es necesario diseñar experimentos específicos, e incluso sondas específicas debido a lo irregular de las interfases y el tamaño tan cambiante que existe. No solamente se trata de producir de forma estable flujos, que en la zona de transición son complejos y difíciles de reproducir de forma exacta, sino adquirir suficiente información para que la información obtenida sea estadísticamente significativa. En esta zona coexisten muy diversos tamaños de burbujas, por lo que seguramente será necesario disponer de diversas sondas o repetir los puntos de media con diversos tamaños de sonda. Además será preciso mejorar mucho el software de procesado y utilizar imágenes para apoyarnos en el desarrollo del software.

- Experimentos para mejorar los modelos de las fuerzas que actúan sobre las burbujas.

Todavía existen bastantes lagunas sobre las fuerzas que actúan sobre las burbujas, sobre todo en el caso de cluster de burbujas. Se hace necesario hacer experimentos para estudiar efectos separados. Por ejemplo sobre los coeficientes de corrección que deben aparecer en las fuerzas que actúan en burbujas individuales, y sobre los que se desarrollan la mayoría de los modelos actuales, para tener en cuenta el efecto del resto del cluster. También se ha de mejorar la comprensión del efecto de la pared sobre las burbujas, sobre todo cuando las burbujas tienen tamaños pequeños en los que la fuerza de deformación puede tener un efecto considerable. También se debería estudiar experimentos que permitan crear modelos que predigan con éxito la wall lubrication force en otras configuraciones no tubulares.

- Mejora de la comprensión de los fenómenos de break-up y coalescencia

Uno de los fenómenos determinantes en el desarrollo del flujo es la rotura y coalescencia de las burbujas. Los modelos actuales no predicen con éxito las tasas de rotura o coalescencia, ello hace necesario plantear experimentos que ayuden a mejorar estos modelos en los que se pueda controlar la rotura o la coalescencia. Se plantearán escenarios con cambios de sección o con obstáculos que puedan producir una tasa considerable de choques, o escenarios con fuertes gradientes de velocidad.

Anexos

A.1 Publicaciones relacionadas con esta tesis	A - 1
A.1.1 Revistas	A - 1
A.1.2 Participación en congresos	A - 1
A.2 Ensayos B-E	A - 3
A.3 Ensayos A.....	A - 39

A.1 Publicaciones relacionadas con esta tesis

A.1.1 Revistas

1. Chiva S, Mendez S., Muñoz-Cobo JL, Julia J.E., Hernandez L, Romero A. Experimental Study On The Two-Phase Flow Characteristics Using Conductivity Probes And Laser Doppler Anemometry In A Vertical Pipe. Special Issue of Chemical Engineering Communications ISSUE 1, 17 (2009). Aceptado para su publicación

2. Chiva, S.; Mendez, S.; Munoz-Cobo, J. L.; Julia, J. E.; Hernández, L. Experimental study on the two-phase flow characteristics using conductivity probes and Laser Doppler Anemometry in a vertical pipe. *Multiphase flow: The ultimate measurement challenge*. 914 (2007) 100-106. ISSN: 0094-243X

3. Munoz-Cobo, J. L., Pena, J., Chiva, S., Mendez, S. Monte-Carlo calculation of the calibration factors for the interfacial area concentration and the velocity of the bubbles for double sensor conductivity probe. *Nuclear Engineering and Design*. Volumen 237 (2007) 484-496. ISSN: 0306-4549

4. J.L. Muñoz-Cobo, S. Chiva, A. Escrivá, S. Méndez. Multigroup interfacial area transport equation for bubbly and cap/slug flows. *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery*. Volúmen 118, (2006) 51-69. ISSN: 0029-5493

A.1.2 Participación en congresos

1. S. Méndez, S. Chiva, J. L. Muñoz-Cobo, A. Escrivá. Medida experimental de los principales parámetros de flujo. XXXIV Reunión Anual SNE. Aceptado, Murcia. Octubre 2008.

2. S. Chiva, J. L. Muñoz-Cobo, S. Méndez. Two-phase flow structure in a vertical pipe: local measurements in two-phase flow using conductivity probes and laser Doppler anemometry. 6th International conference on multiphase flow, ICMF. Leipzig, Germany. July 9 – 13, 2007. ISSN: 978-3-86010-913-7.

A.1 Publicaciones relacionadas con esta tesis

3. S. Chiva, J. L. Muñoz-Cobo, S. Méndez. Local measurements in two-phase flow using a double-sensor conductivity probes and laser doppler anemometry in a vertical pipe. International conference on nuclear engineering (ICONE15). Nagoya Japón. Abril 2007.

4. S. Chiva, J. L. Muñoz-Cobo, S. Méndez. An experimental study on the two-phase flow characteristics using conductivity probes and laser doppler anemometry in a vertical pipe. The 5th Int. Symp. on Measurement Techniques for Multiphase Flows (5th ISMTMF). Macau, China. 2006. ISSN: 978-0-7354-0422-9

5. S. Chiva, S. Méndez, J. L. Muñoz-Cobo, J. Santiago. Instrumentación de la instalación PUMA, para medidas de flujo bifásico y transporte de área interfacial. XXX Reunión Anual SNE. Alicante Octubre 2004. ISSN: 1137-2885. Senda Editorial, S. A.

A.2 Ensayos B-E

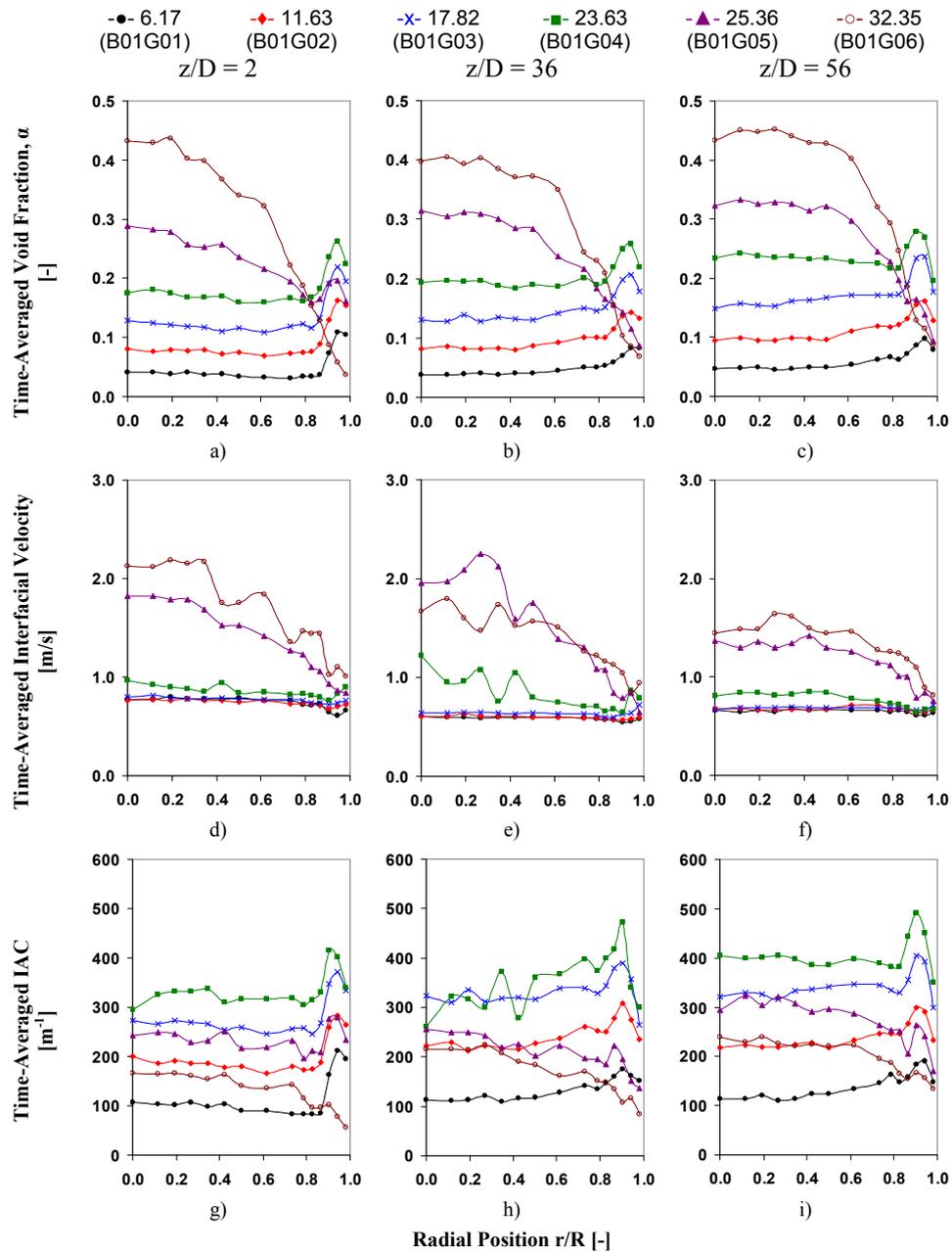


Figura A.1 Ensayo B01 para $j_f = 0.5$ m/s

A.2 Ensayos B-E

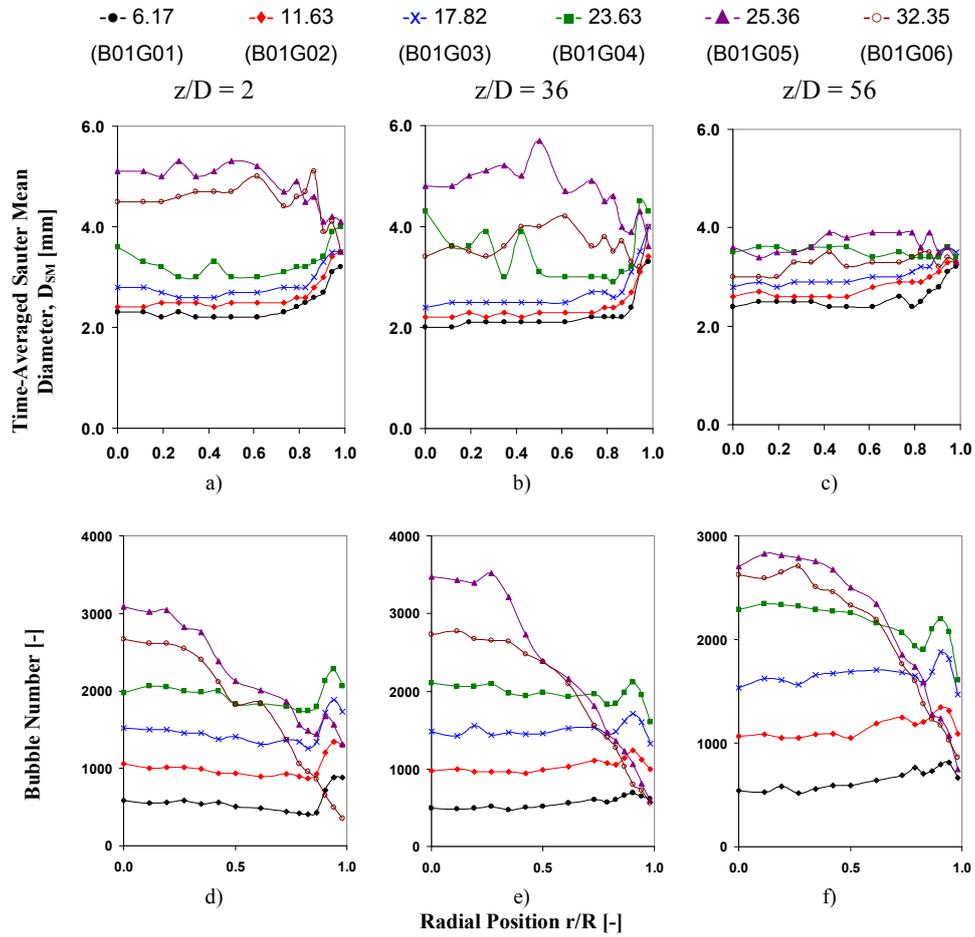


Figura A.2 Ensayo B01 para $j_f = 0.5$ m/s

·x· 0.0 (B01G00)
 -●- 6.17 (B01G01)
 -◆- 11.63 (B01G02)
 -x- 17.82 (B01G03)
 -■- 23.63 (B01G04)
 -▲- 25.36 (B01G05)
 -○- 32.35 (B01G06)

$z/D = 50$

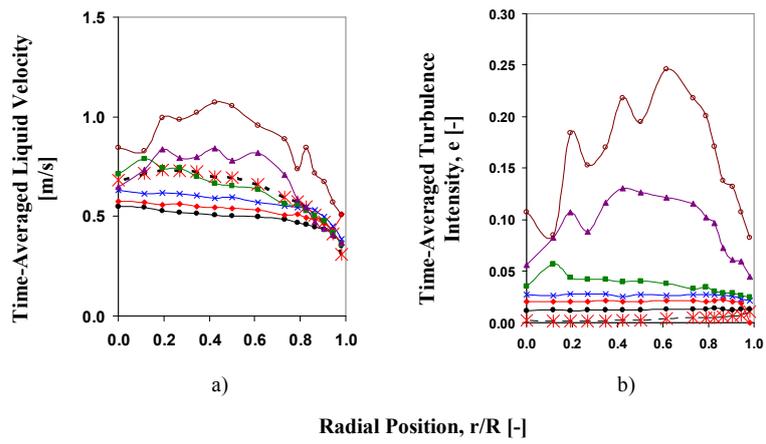


Figura A.3 Ensayo B01 para $j_1 = 0.5$ m/s

A.2 Ensayos B-E

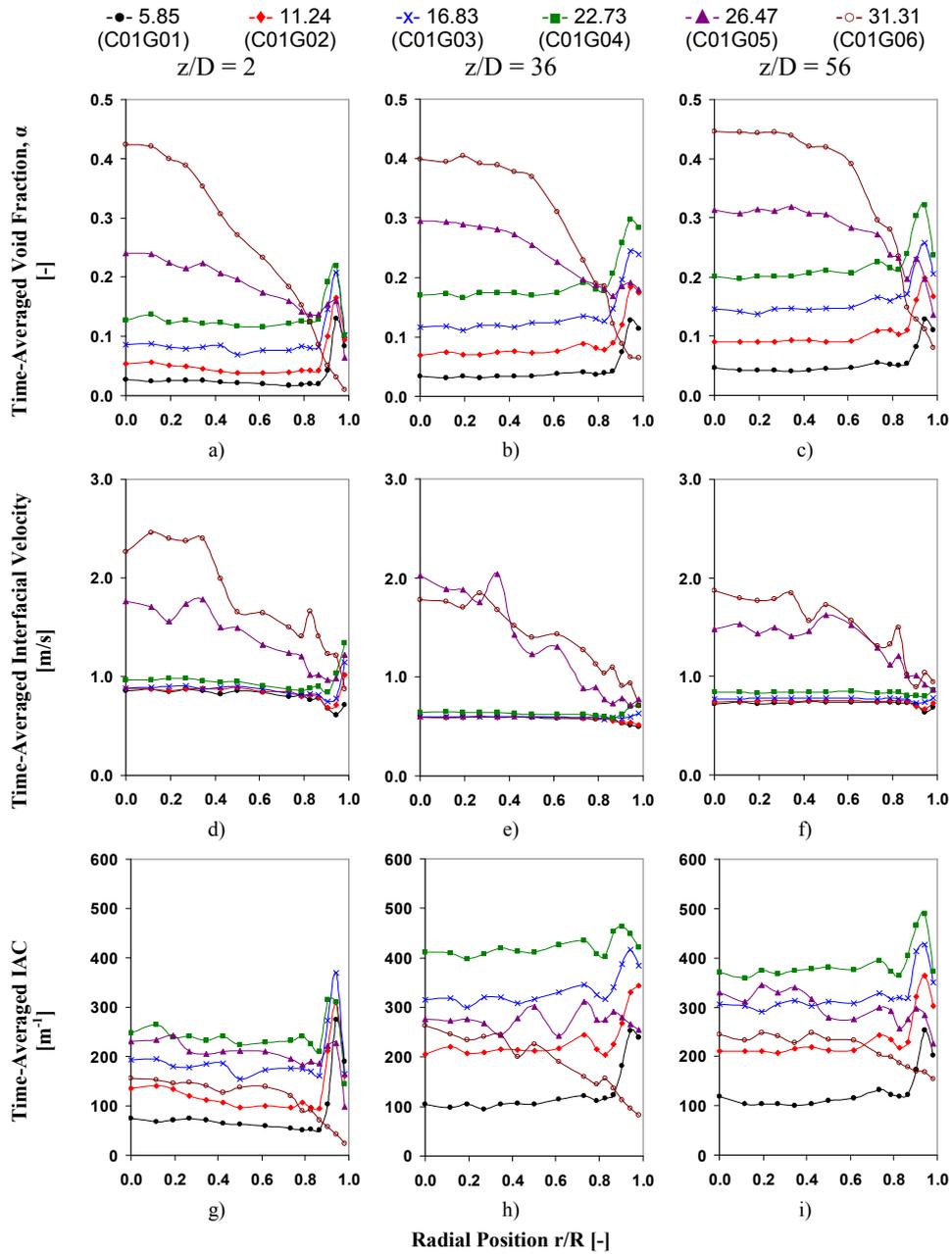


Figura A.4 Ensayo C01 para $j_f = 0.5$ m/s

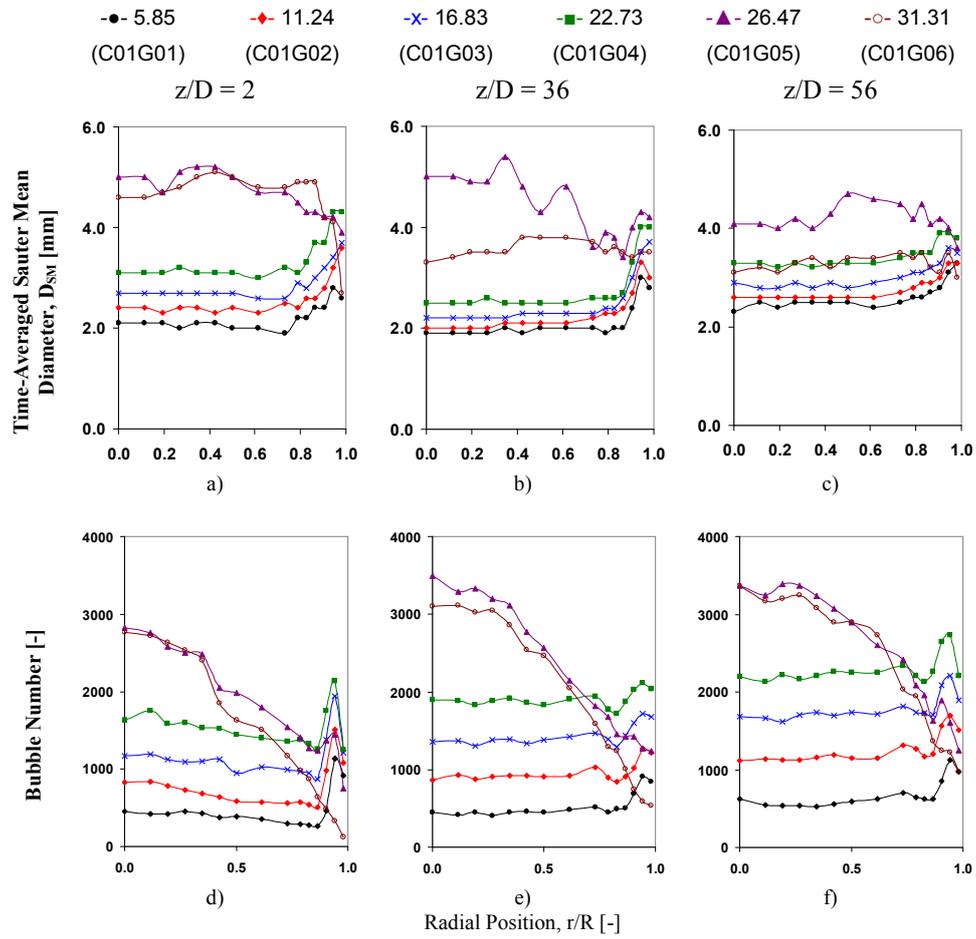


Figura A.5 Ensayo C01 para $j_f = 0.5$ m/s

A.2 Ensayos B-E

* * * 0.0 (C01G00)
 ● 5.85 (C01G01)
 ◆ 11.24 (C01G02)
 x 16.83 (C01G03)
 ■ 22.73 (C01G04)
 ▲ 26.47 (C01G05)
 ○ 31.31 (C01G06)

$z/D = 50$

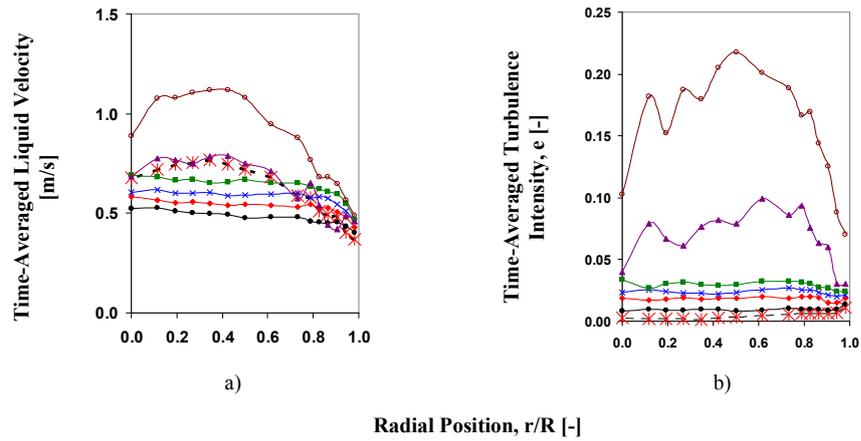


Figura A.6 Ensayo C01 para $j_l = 0.5$ m/s

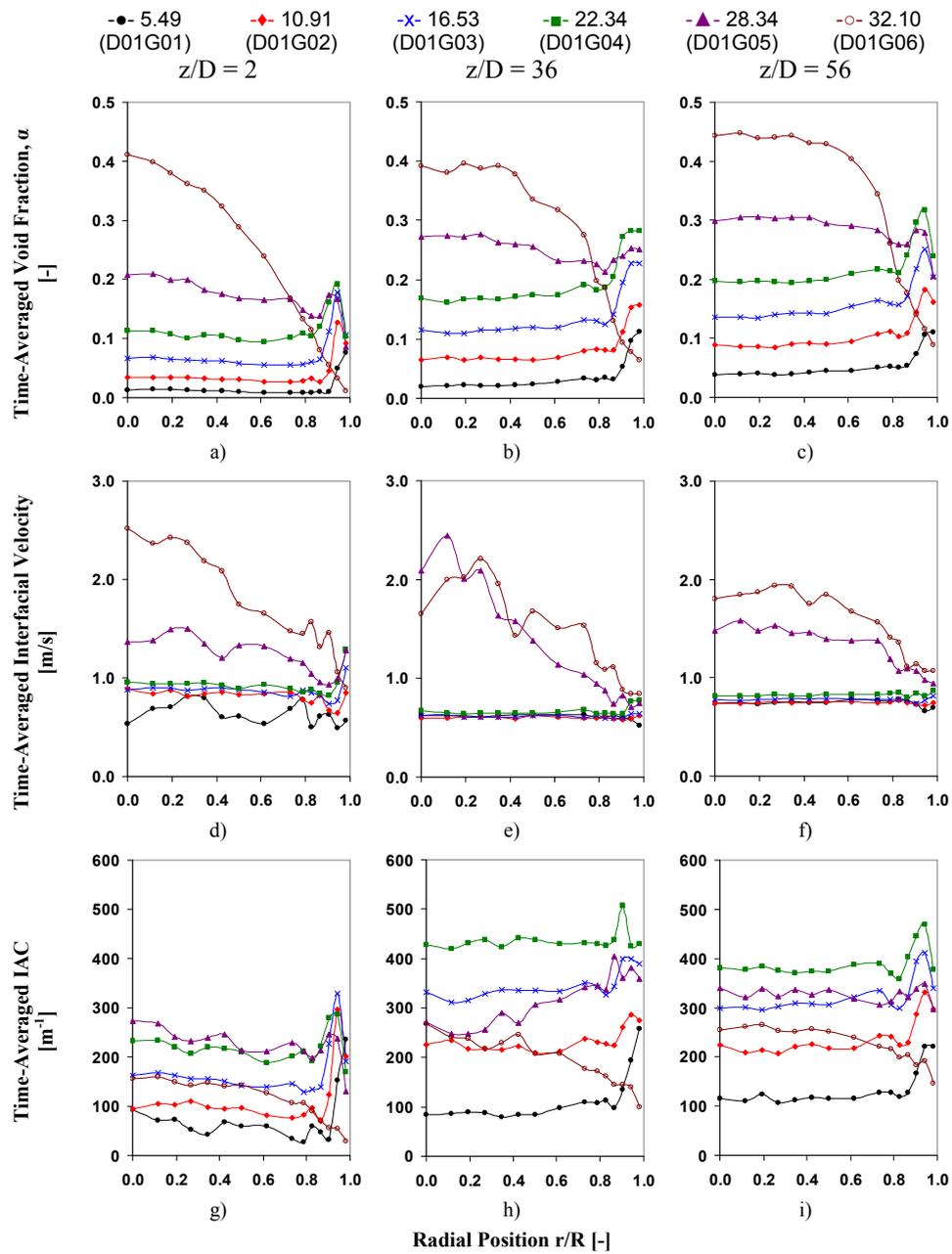


Figura A.7 Ensayo D01 para $j_f = 0.5$ m/s

A.2 Ensayos B-E

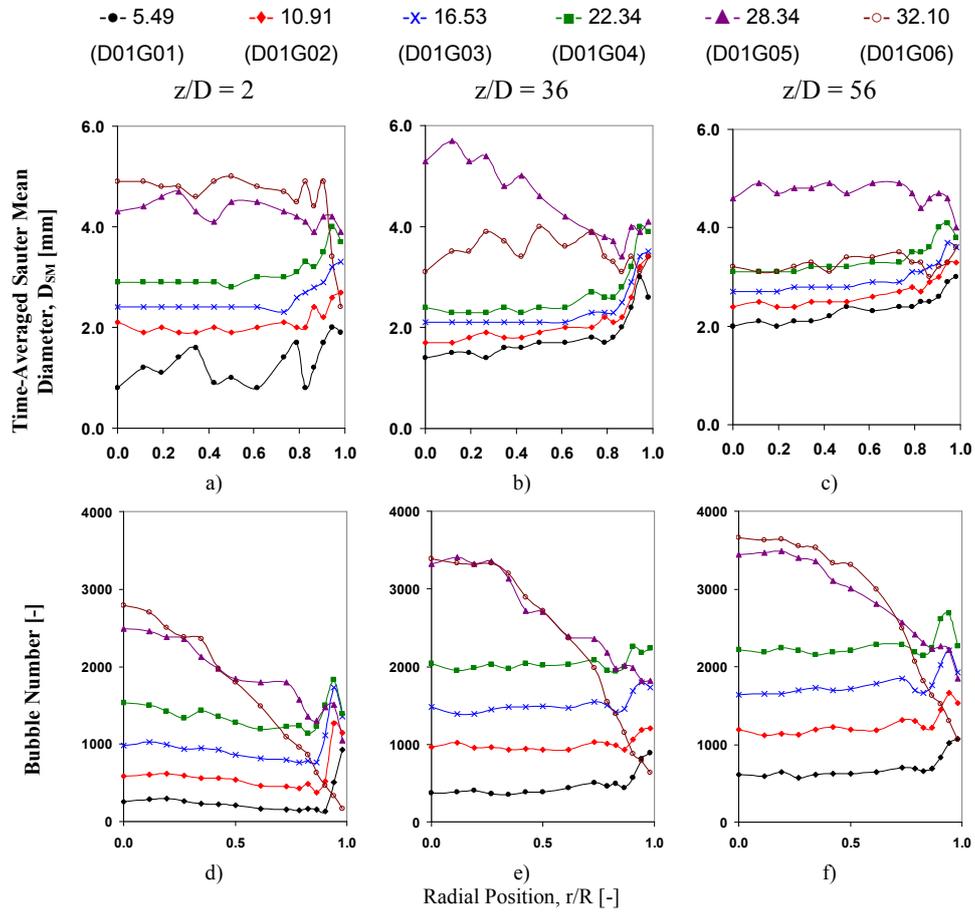


Figura A.8 Ensayo D01 para $j_f = 0.5$ m/s

-- 0.0 (D01G00)
 ●-- 5.49 (D01G01)
 ◆-- 10.91 (D01G02)
 x-- 16.53 (D01G03)
 ■-- 22.34 (D01G04)
 ▲-- 28.34 (D01G05)
 ○-- 32.10 (D01G06)

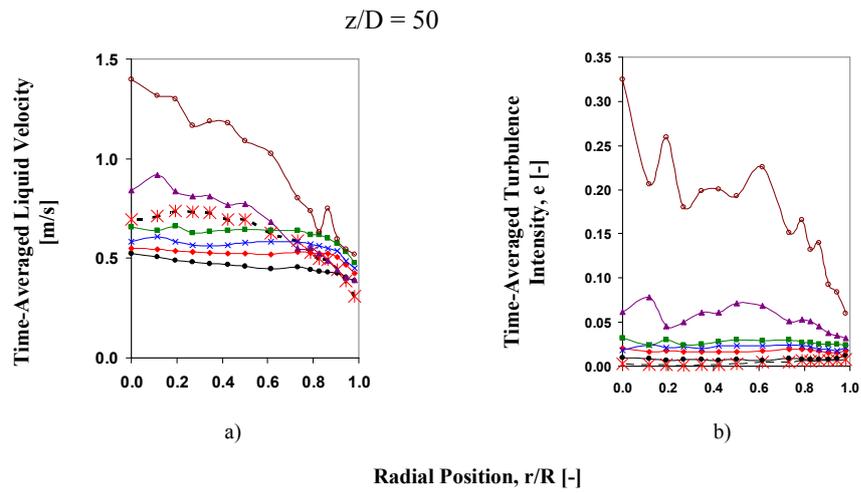


Figura A.9 Ensayo D01 para $j_l = 0.5$ m/s

A.2 Ensayos B-E

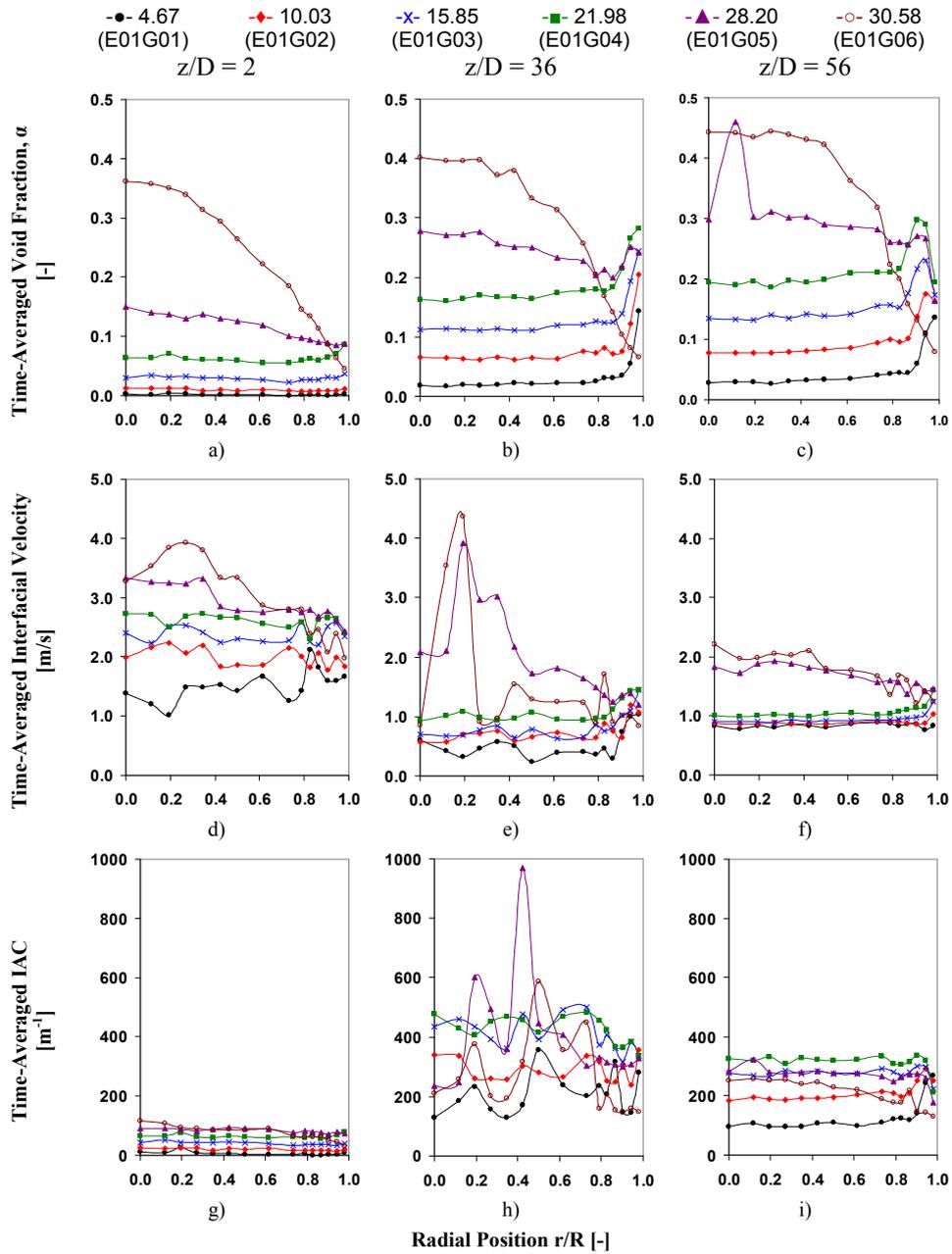


Figura A.10 Ensayo E01 para $j_f = 0.5$ m/s

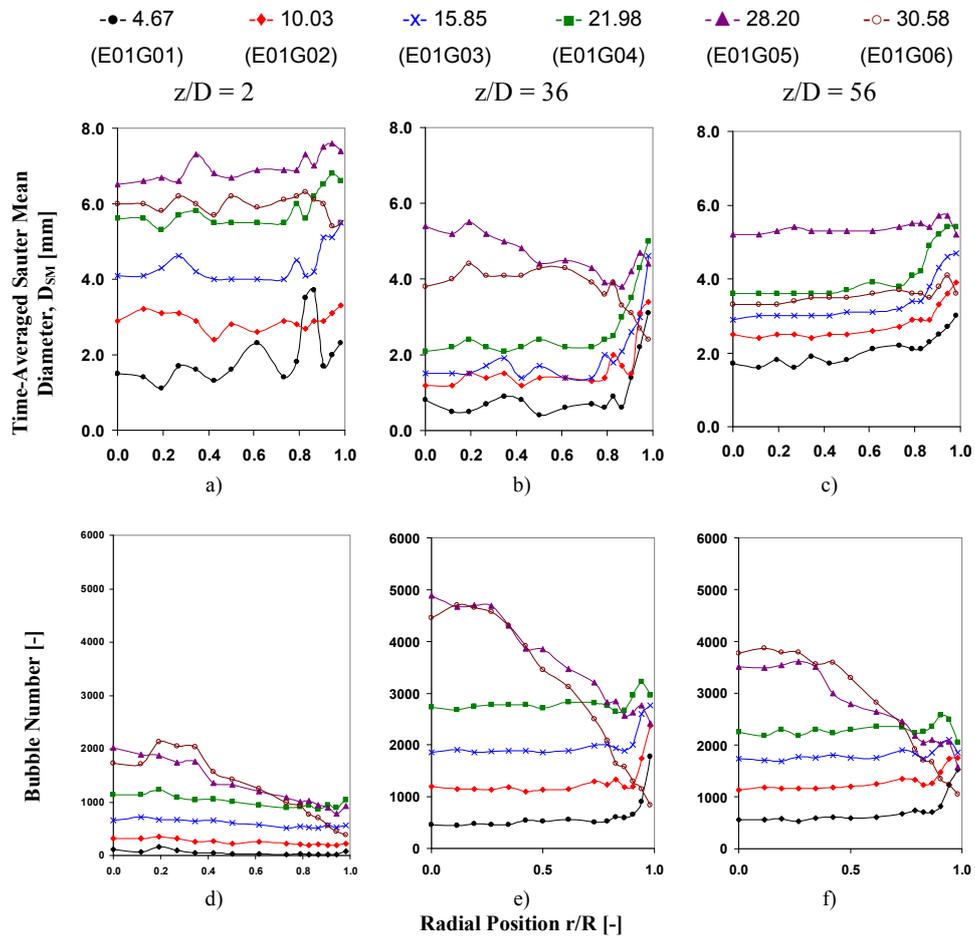


Figura A.11 Ensayo E01 para $j_f = 0.5$ m/s

A.2 Ensayos B-E

·x· 0.0 (E01G00) ● 4.67 (E01G01) ◆ 10.03 (E01G02) × 15.85 (E01G03) ■ 21.98 (E01G04) ▲ 28.20 (E01G05) ○ 30.58 (E01G06)

$z/D = 50$

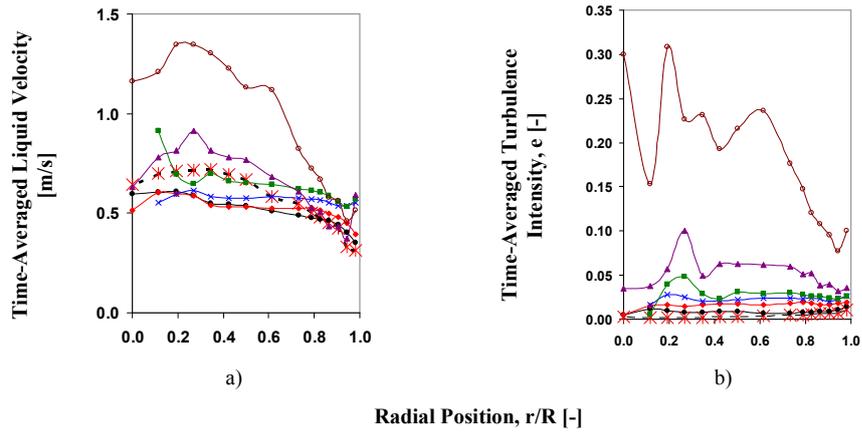


Figura A.12 Ensayo E01 para $j_1 = 0.5$ m/s

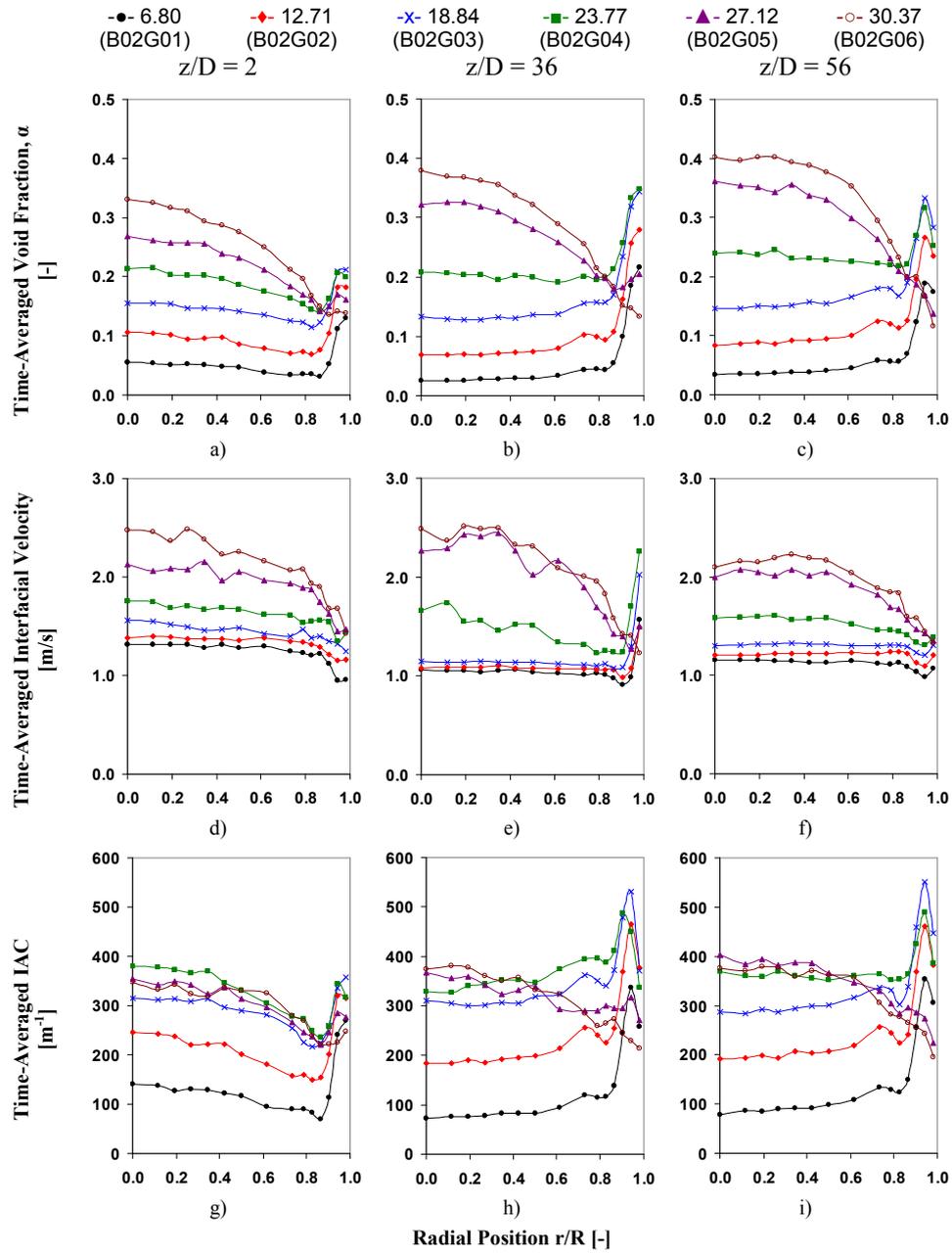


Figura A.13 Ensayo B02 para $j_f = 1.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

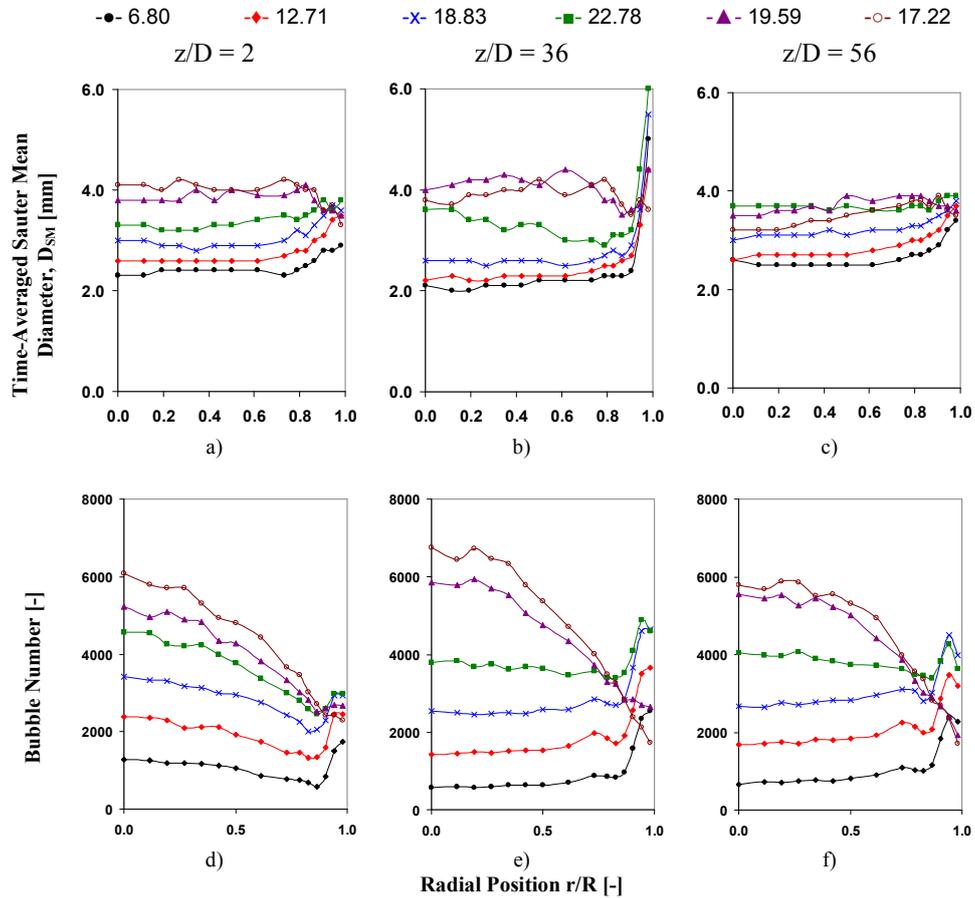


Figura A.14 Ensayo B02 para $j_f = 1.0$ m/s

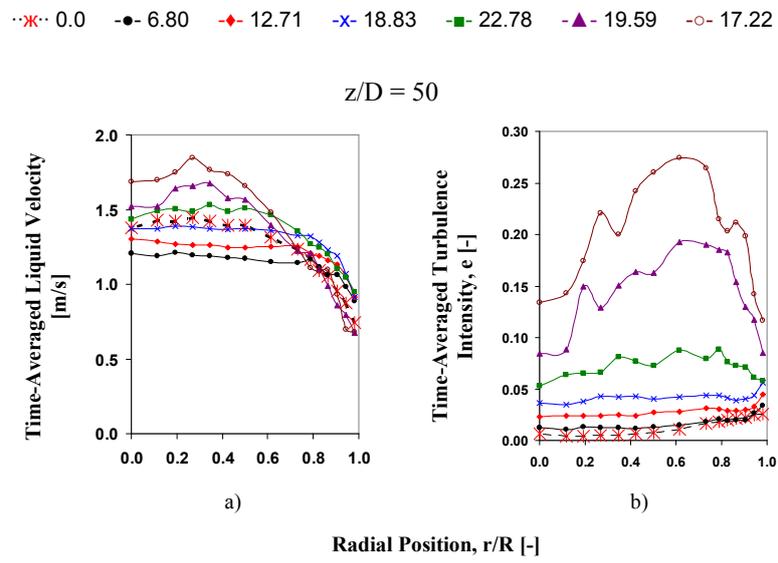


Figura A.15 Ensayo B02 para $j_1 = 1.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

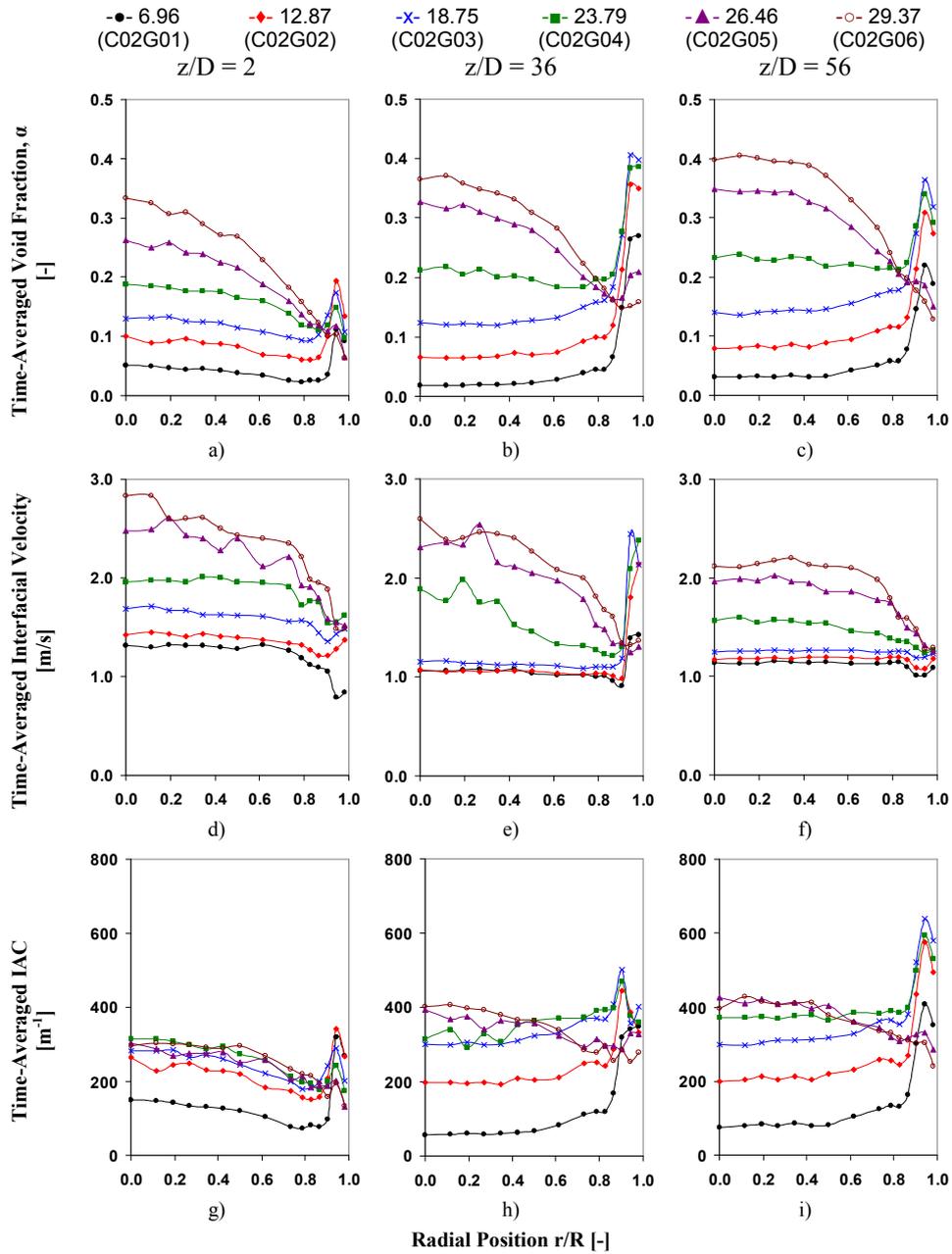


Figura A.16 Ensayo C02 para $j_f = 1.0$ m/s

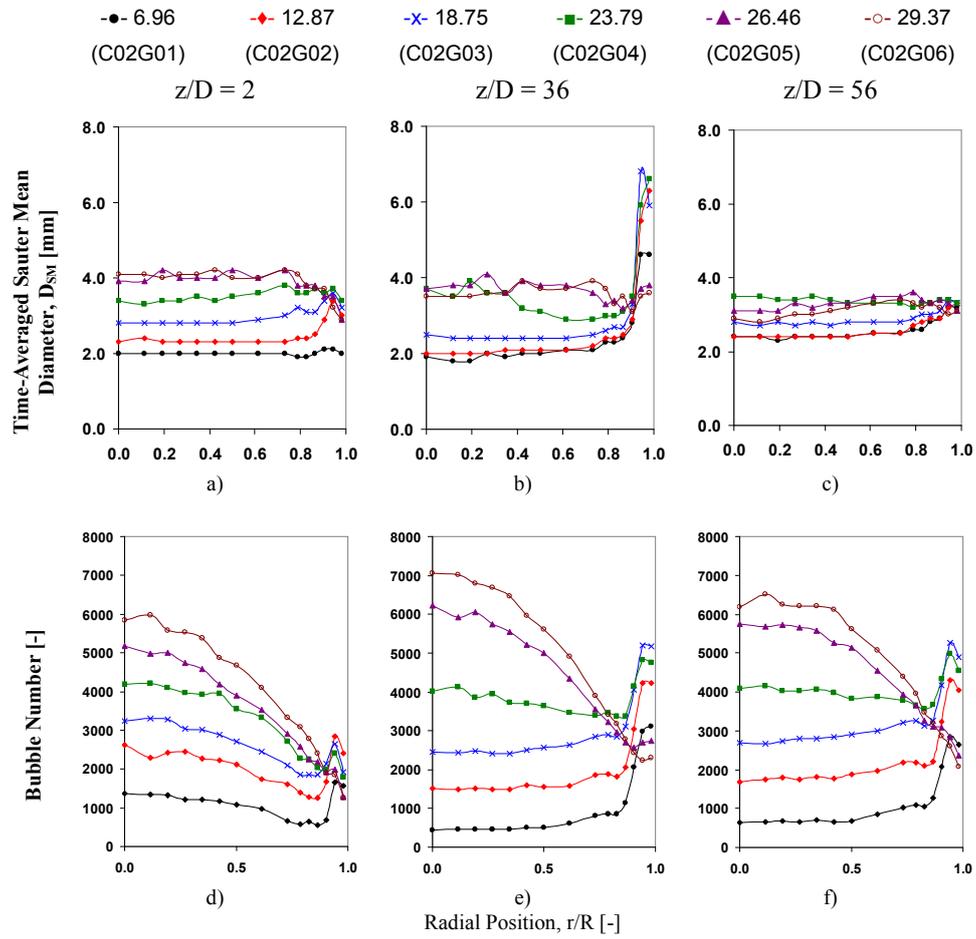


Figura A.17 Ensayo C02 para $j_f = 1.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

* * * 0.0 (C02G00)
 ● 6.96 (C02G01)
 ◆ 12.87 (C02G02)
 x 18.75 (C02G03)
 ■ 23.79 (C02G04)
 ▲ 26.46 (C02G05)
 ○ 29.37 (C02G06)

$z/D = 50$

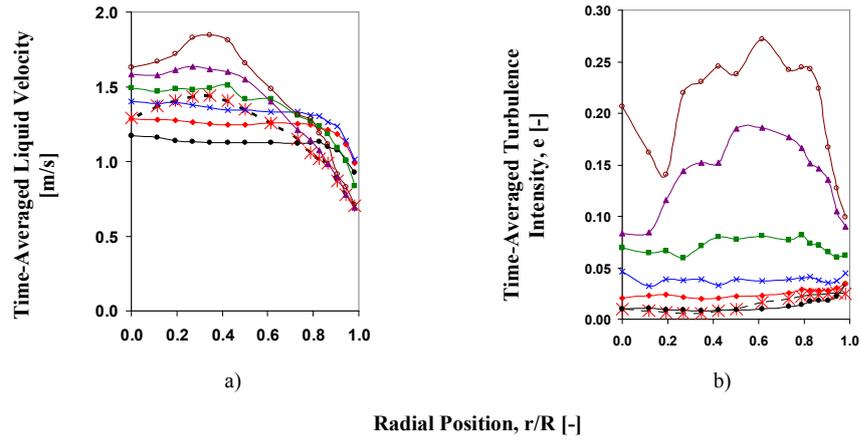


Figura A.18 Ensayo C02 para $j_1 = 1.0$ m/s

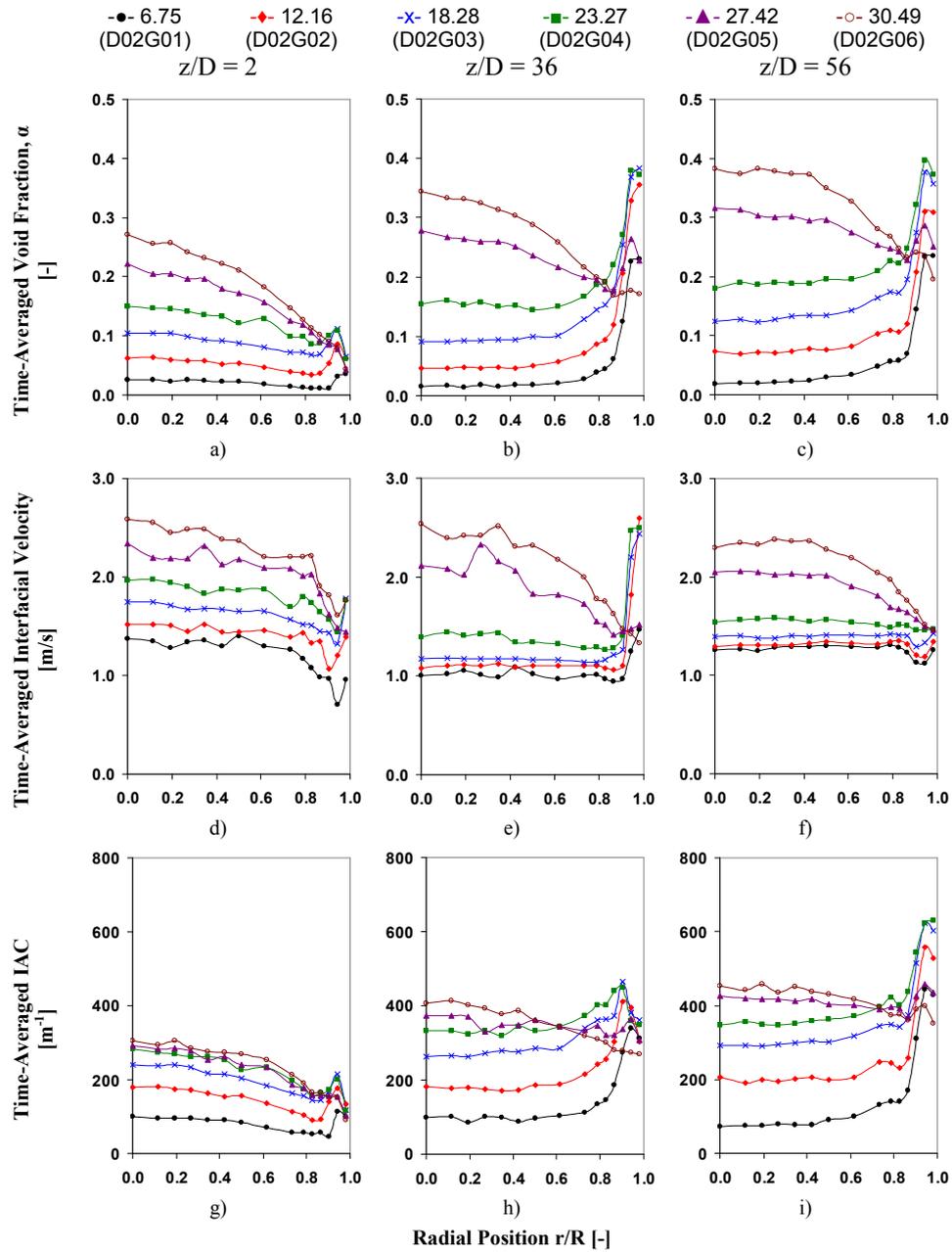


Figura A.19 Ensayo D02 para $j_f = 1.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

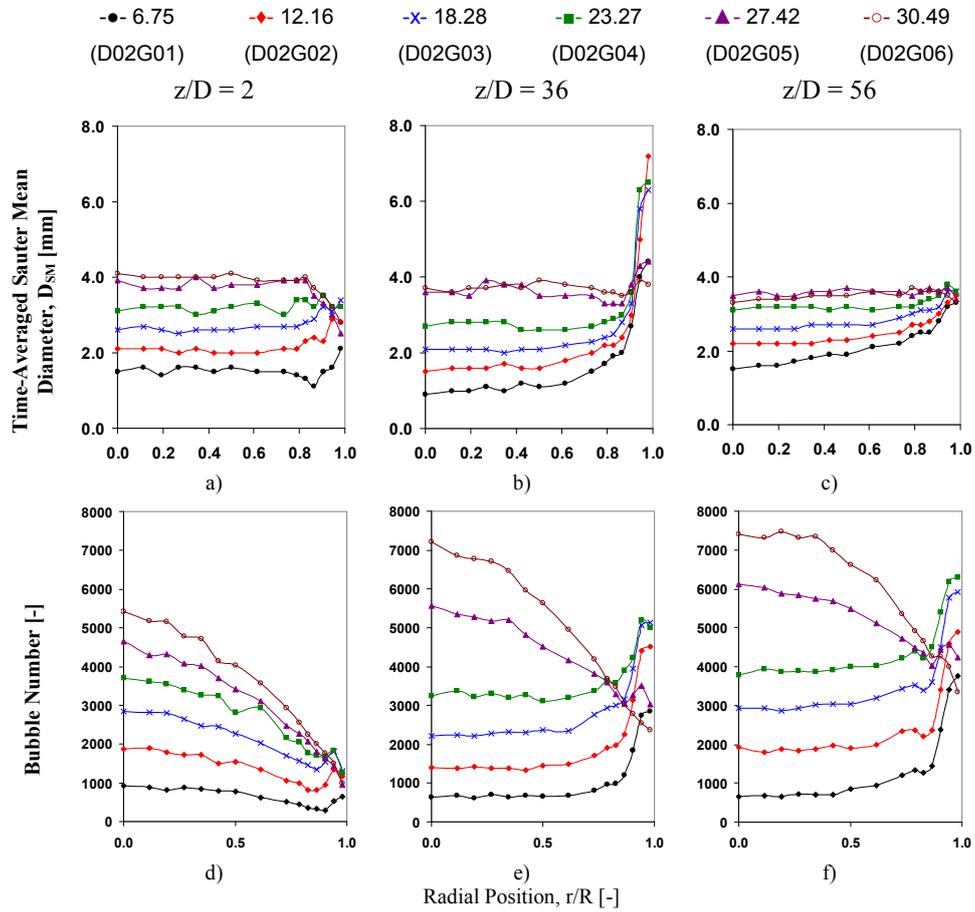


Figura 7.8 Ensayo A.20 para $j_f = 1.0$ m/s

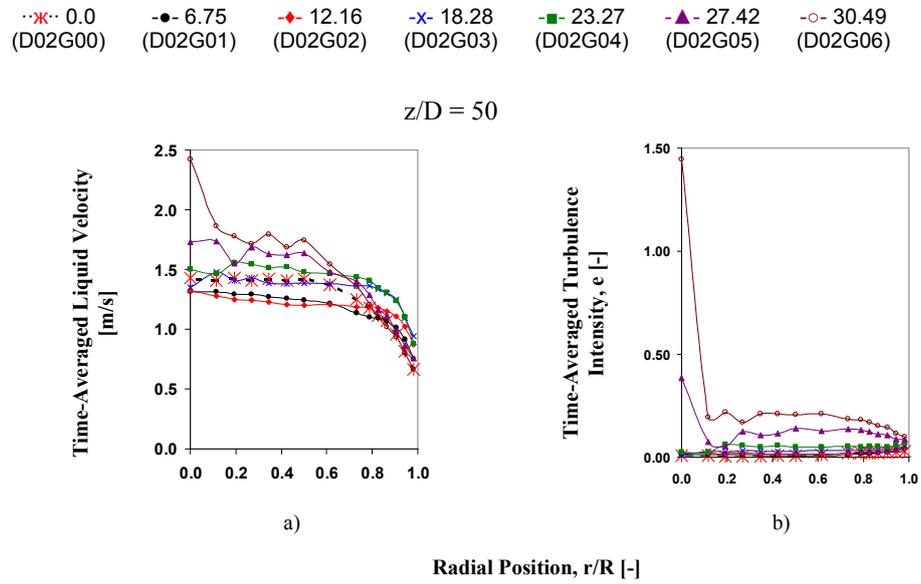


Figura A.21 Ensayo D02 para $j_1 = 1.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

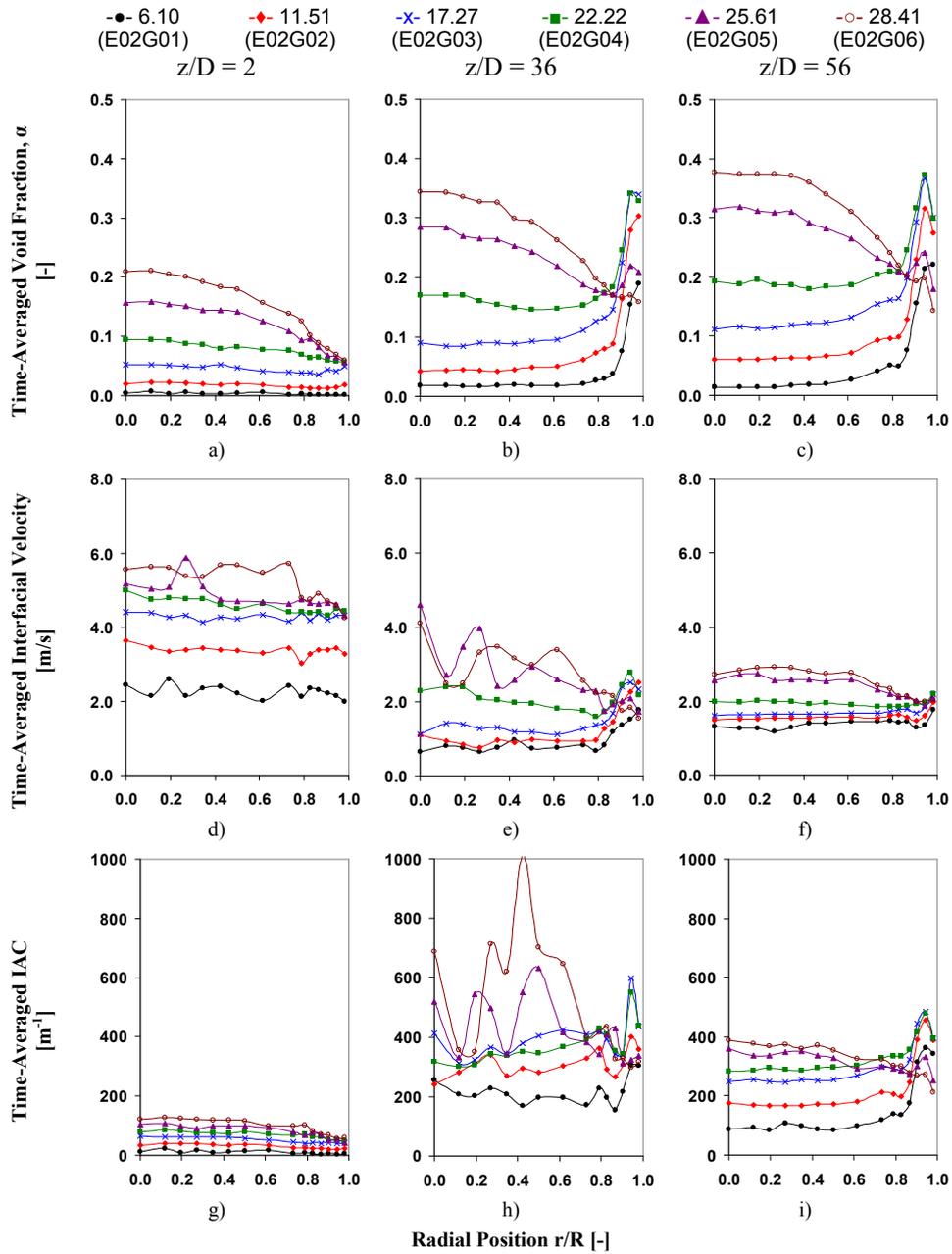


Figura A.22 Ensayo E02 para $j_f = 1.0$ m/s

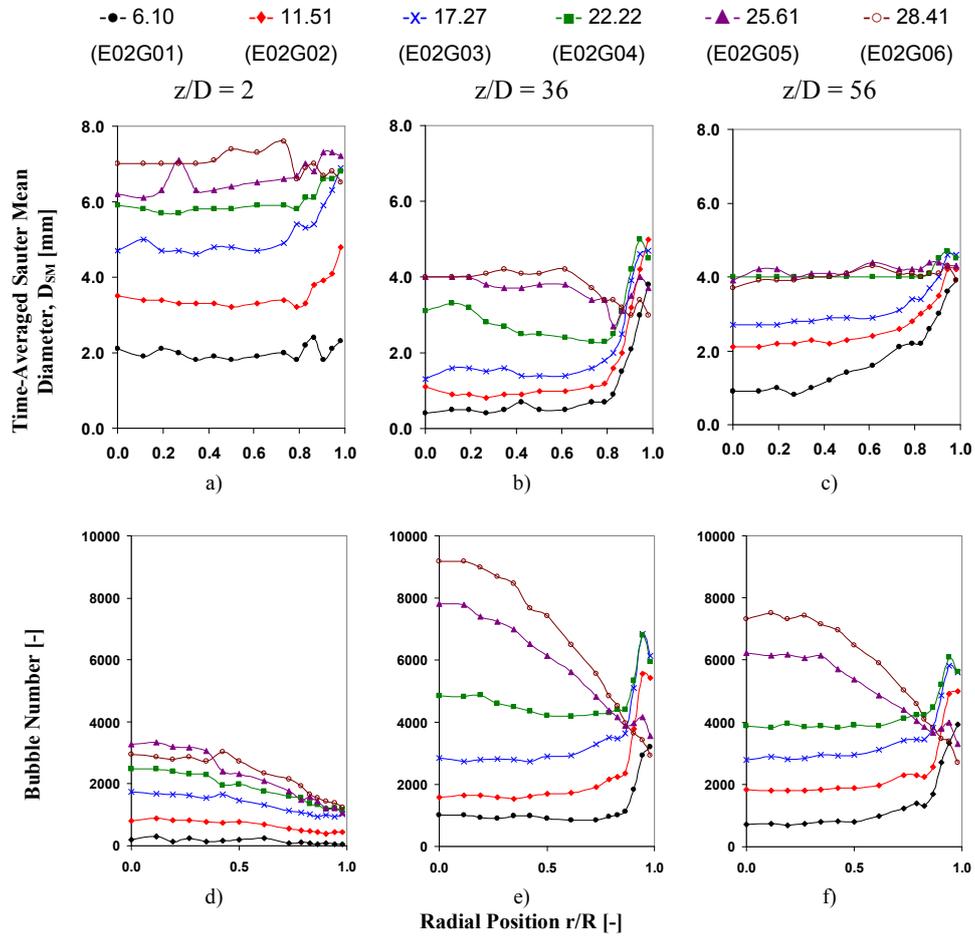


Figura A.23 Ensayo E02 para $j_f = 1.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

·x· 0.0 (E02G00)
 -●- 6.10 (E02G01)
 -◆- 11.51 (E02G02)
 -x- 17.27 (E02G03)
 -■- 22.22 (E02G04)
 -▲- 25.61 (E02G05)
 -○- 28.41 (E02G06)

$z/D = 50$

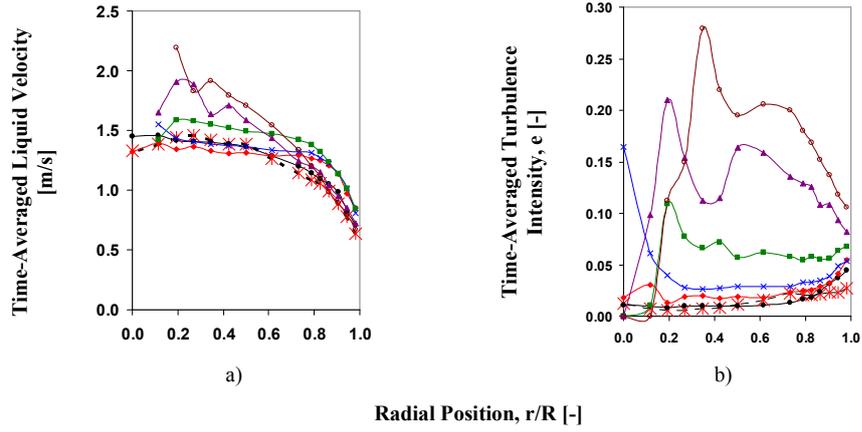


Figura A.24 Ensayo E02 para $j_1 = 1.0$ m/s

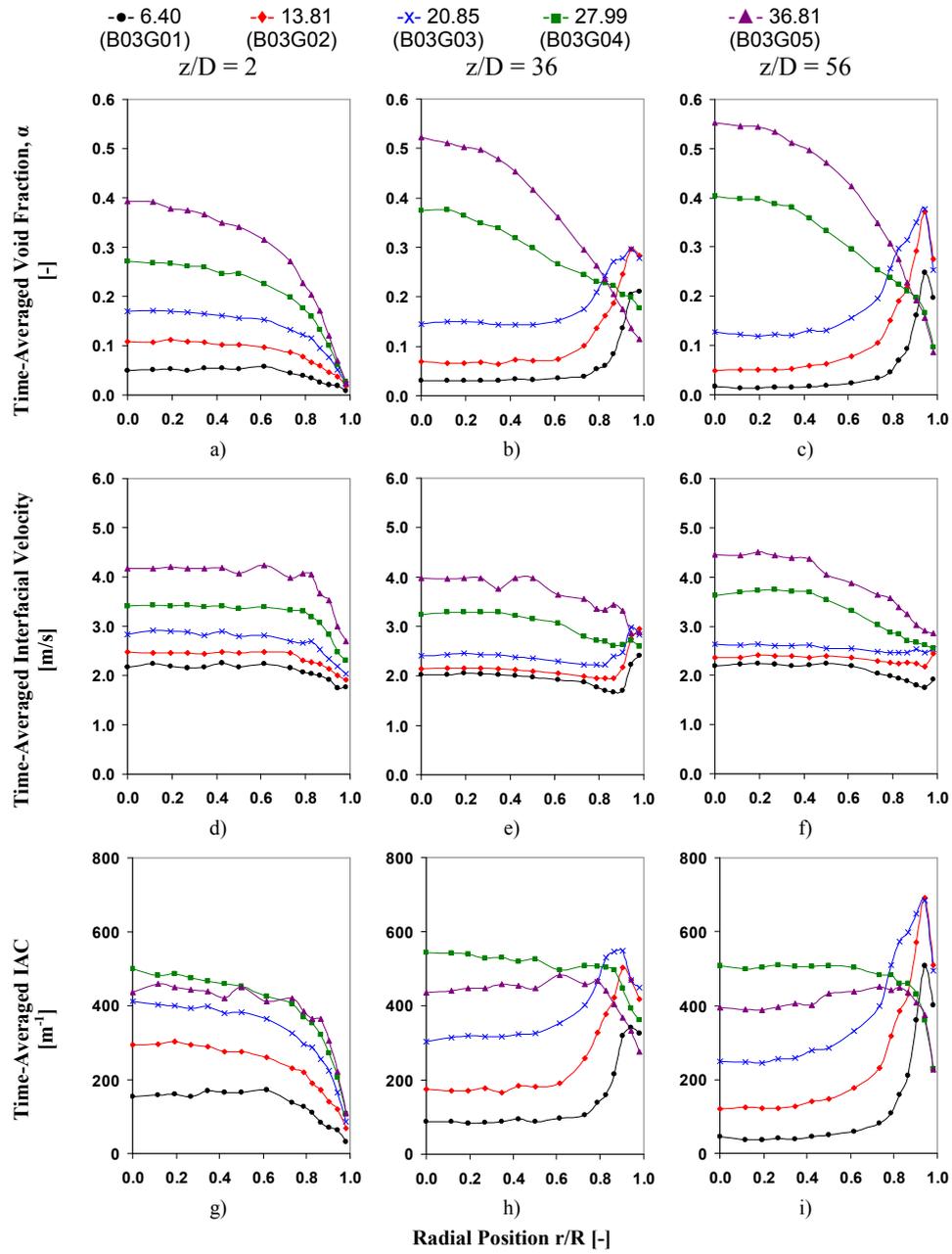


Figura A.25 Ensayo B03 para $j_f = 2.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

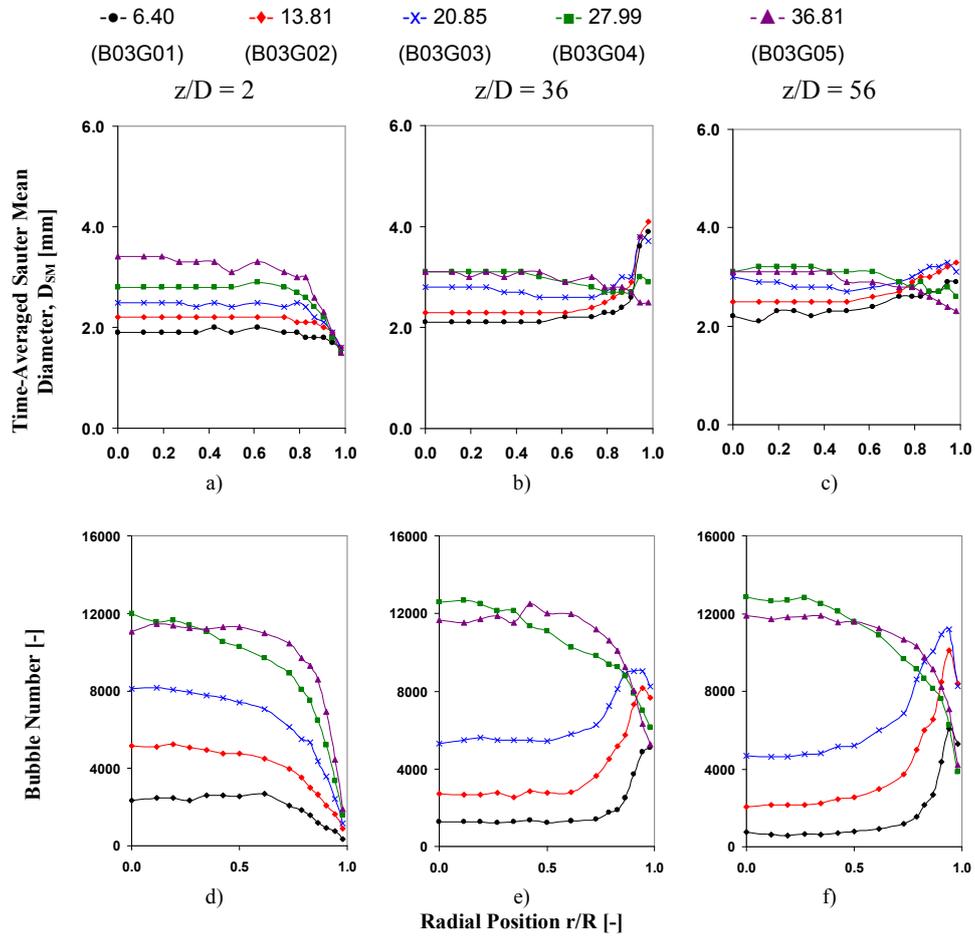


Figura A.26 Ensayo B03 para $j_f = 2.0$ m/s

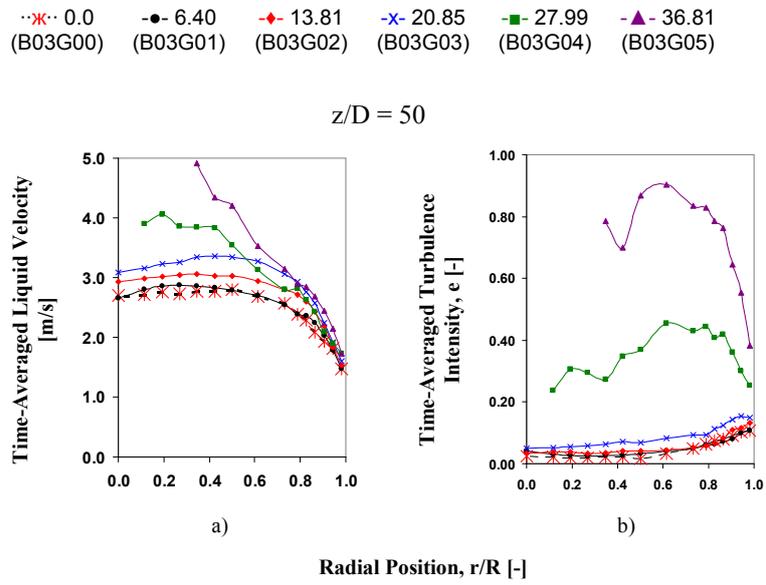


Figura A.27 Ensayo B03 para $j_1 = 2.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

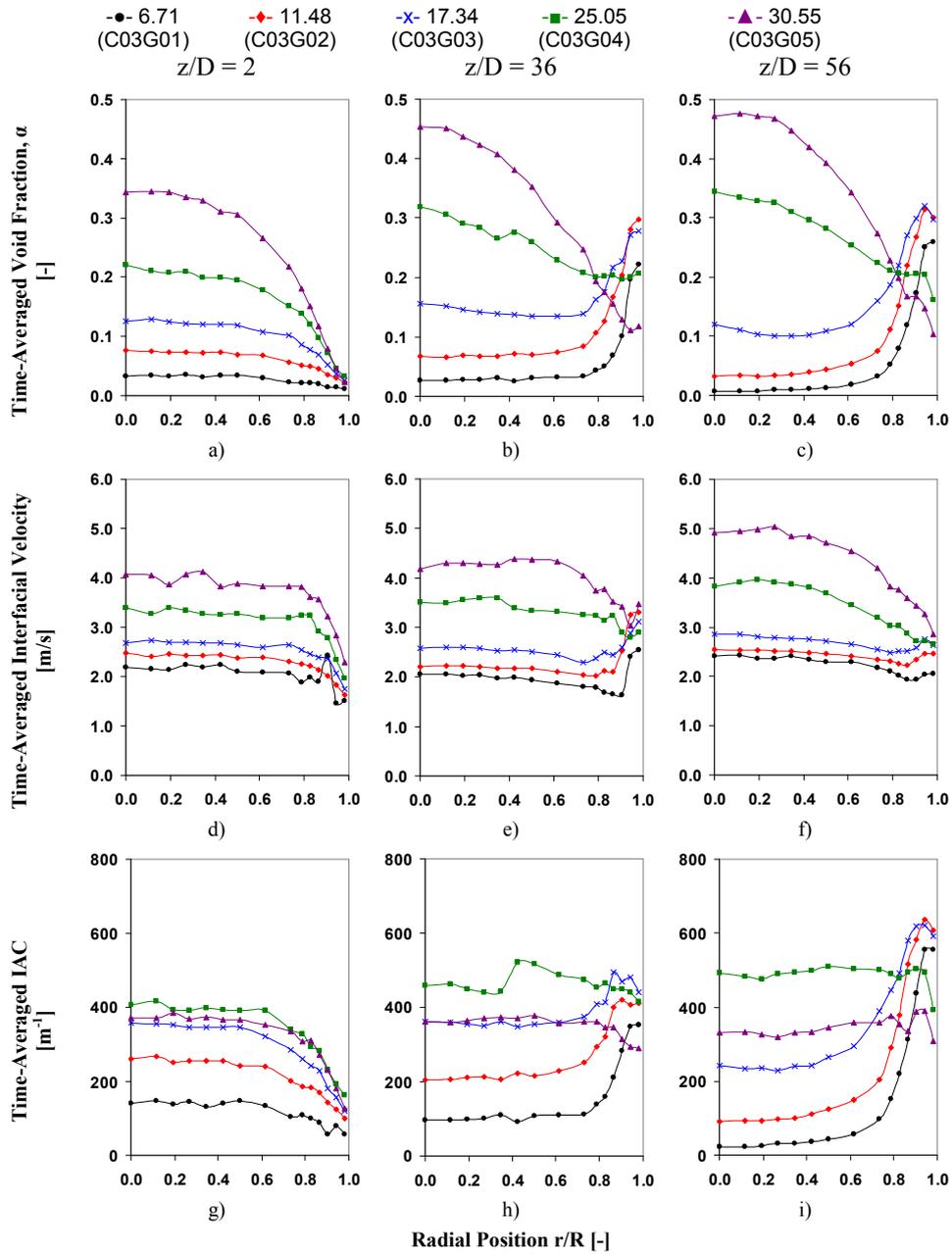


Figura A.28 Ensayo C03 para $j_f = 2.0$ m/s

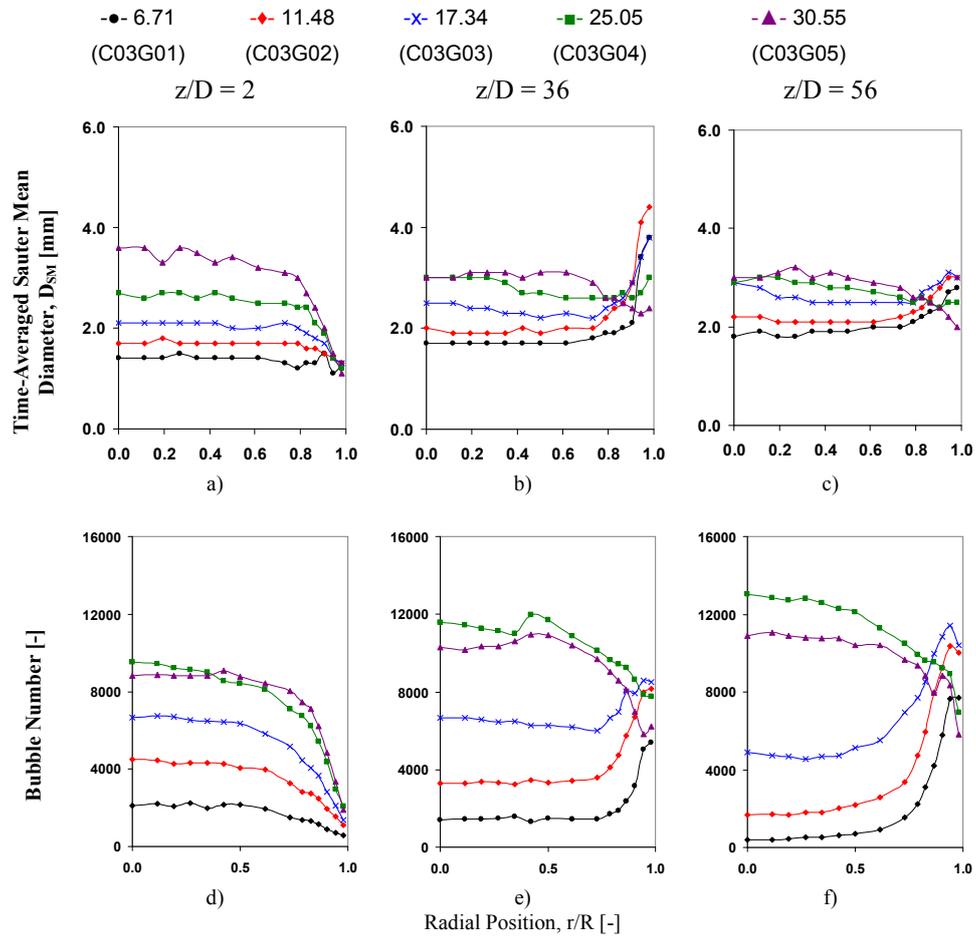


Figura A.29 Ensayo C03 para $j_f = 2.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

* * * 0.0 (C03G00)
 ● 6.71 (C03G01)
 ◆ 11.48 (C03G02)
 x 17.34 (C03G03)
 ■ 25.05 (C03G04)
 ▲ 30.55 (C03G05)

$z/D = 50$

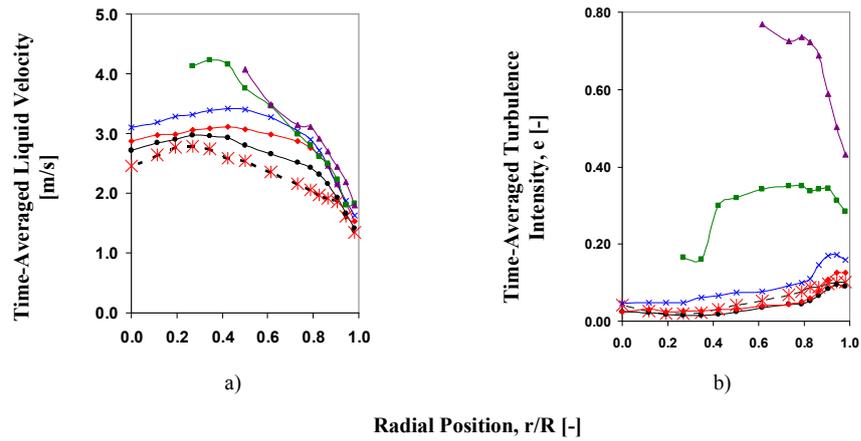


Figura A.30 Ensayo C03 para $j_1 = 2.0$ m/s

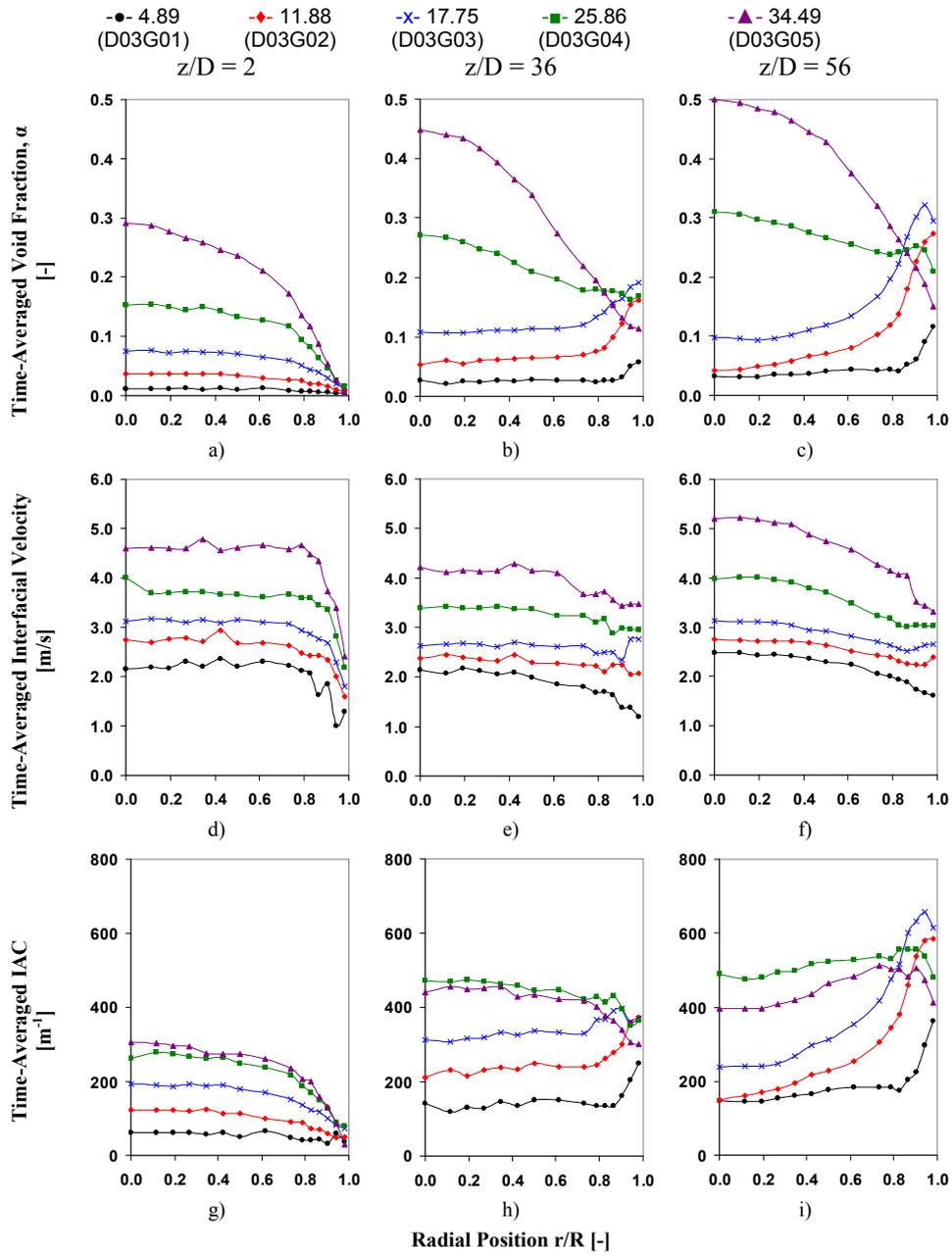


Figura A.31 Ensayo D03 para $j_f = 2.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

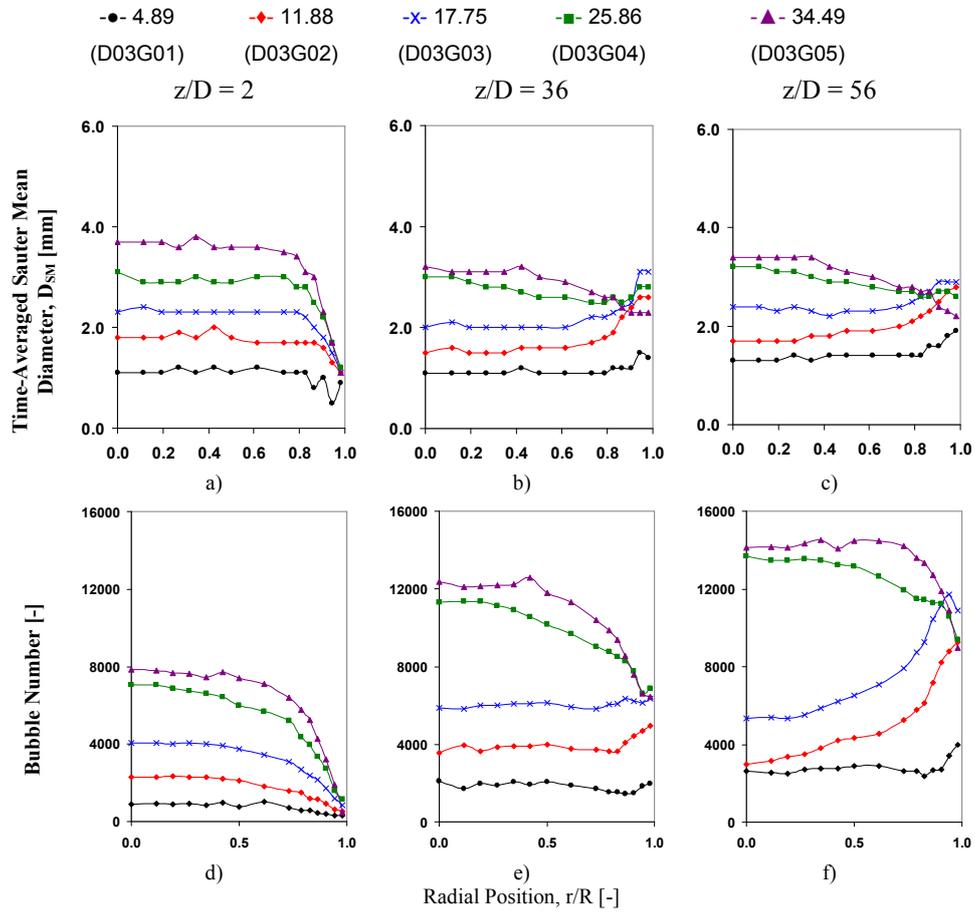


Figura A.32 Ensayo D03 para $j_f = 2.0$ m/s

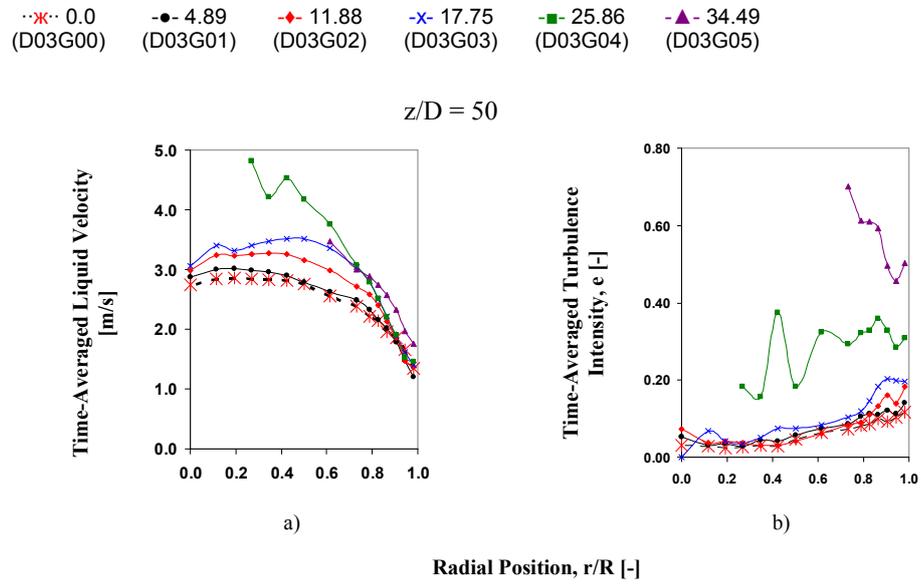


Figura A.33 Ensayo D03 para $j_1 = 2.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

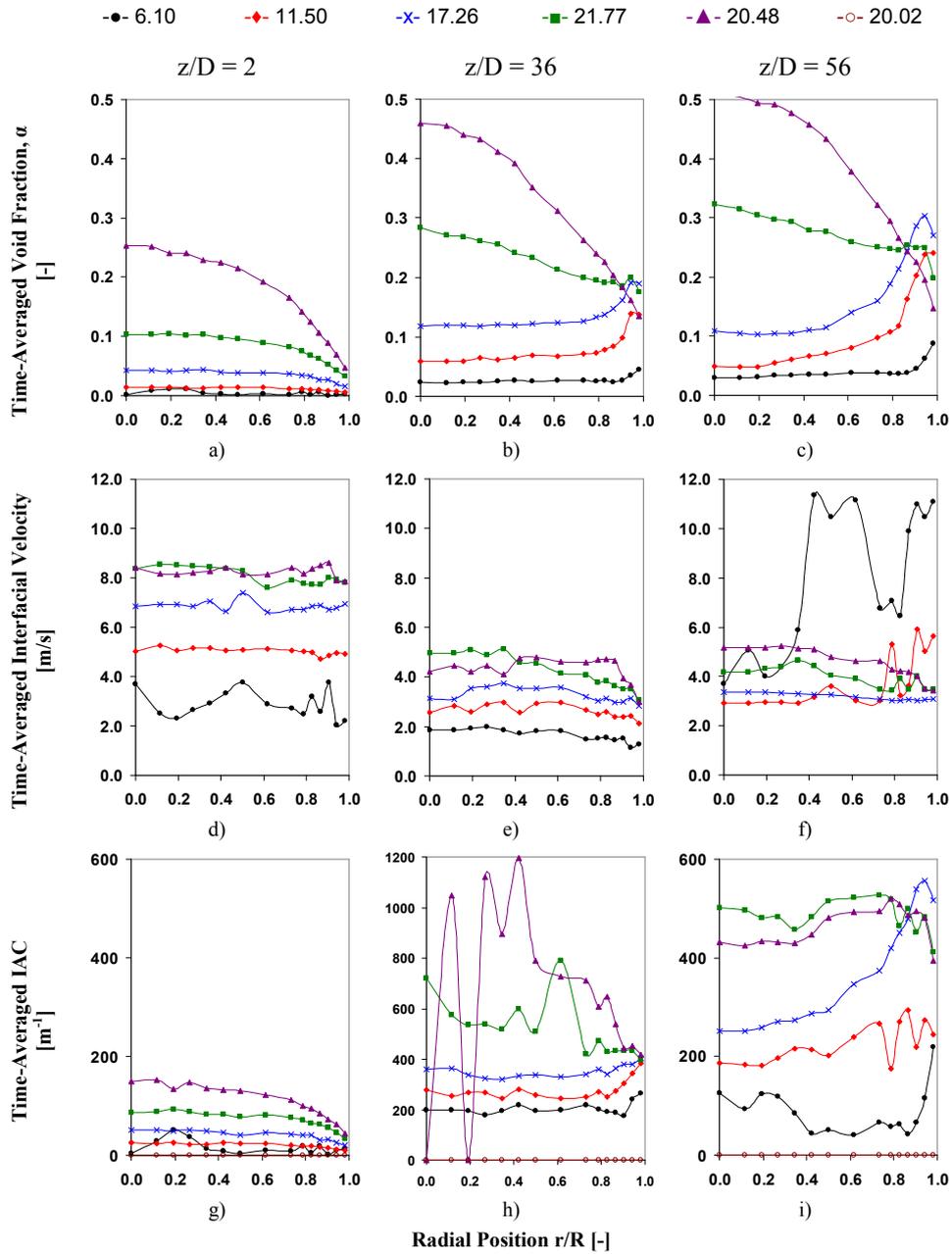


Figura A.34 Ensayo E03 para $j_f = 2.0$ m/s

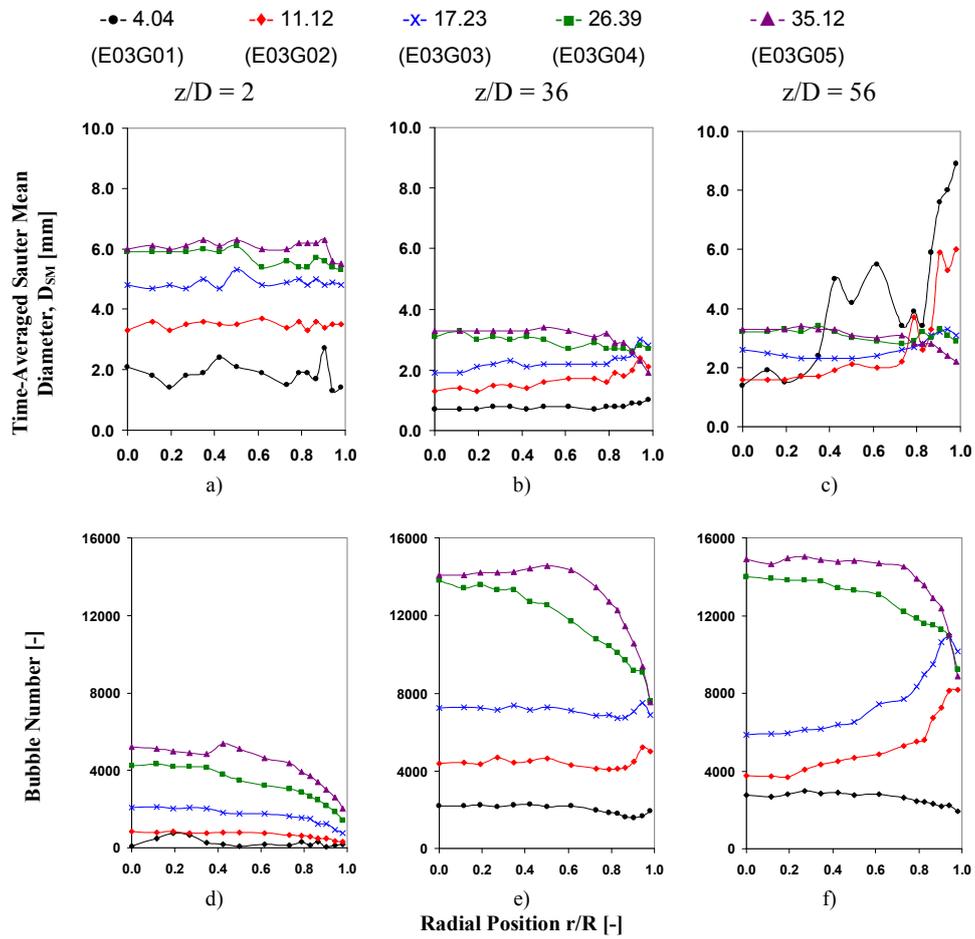


Figura A.35 Ensayo E03 para $j_f = 2.0$ m/s

A.2 Ensayos B-E

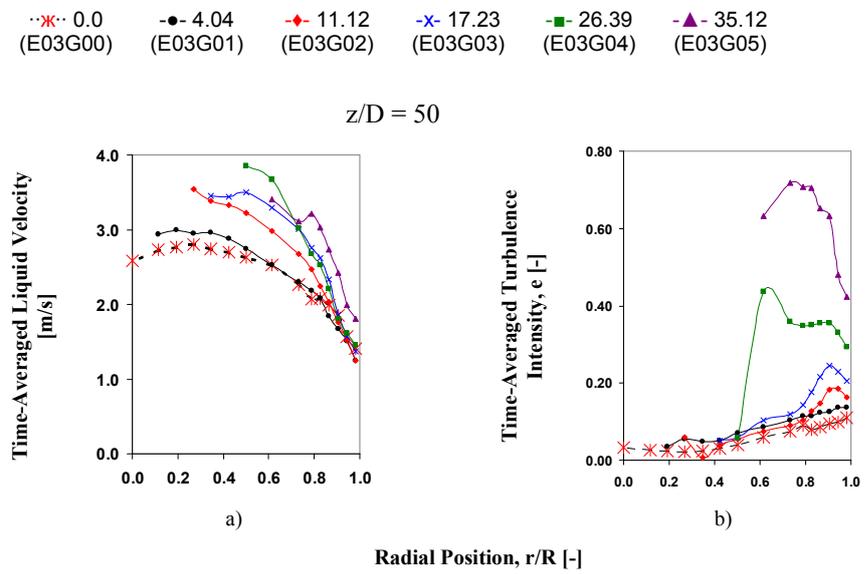


Figura A.36 Ensayo E03 para $j_1 = 2.0$ m/s

A.3 Ensayos A

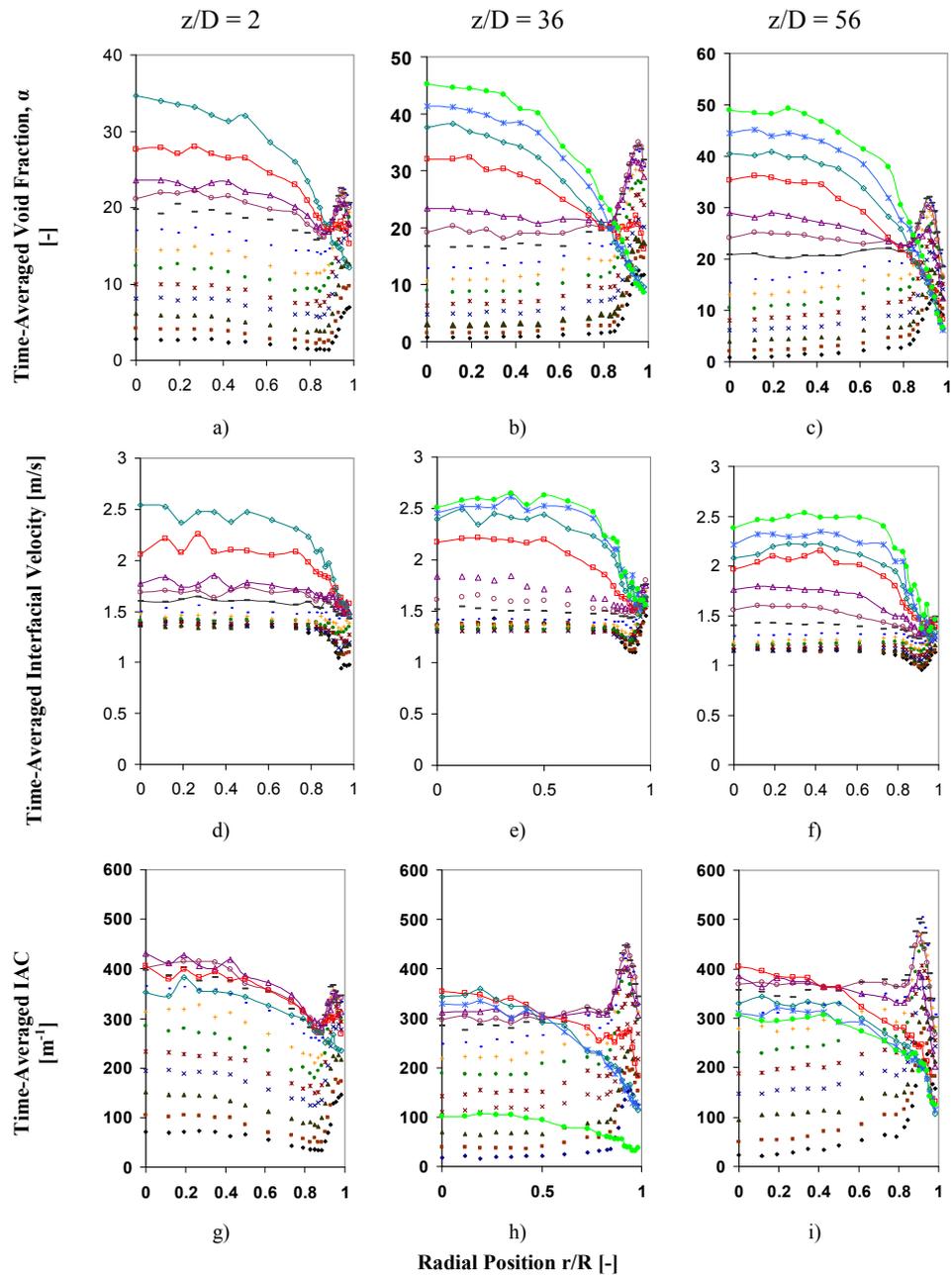


Figura A.37 Ensayo A para $j_f = 1$ m/s

A.3 Ensayos A

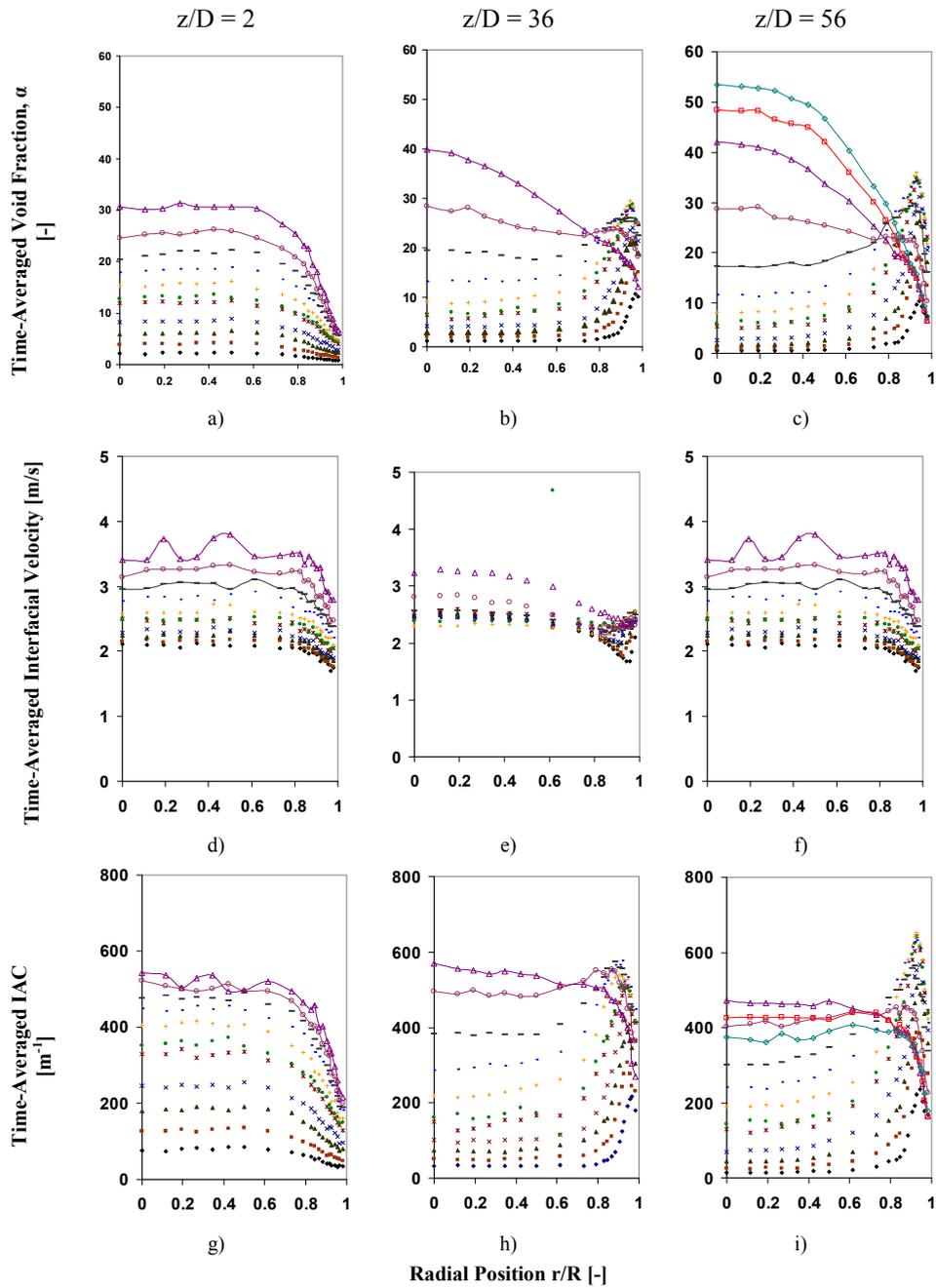


Figura A.38 Ensayo A para $j_f = 2.0$ m/s

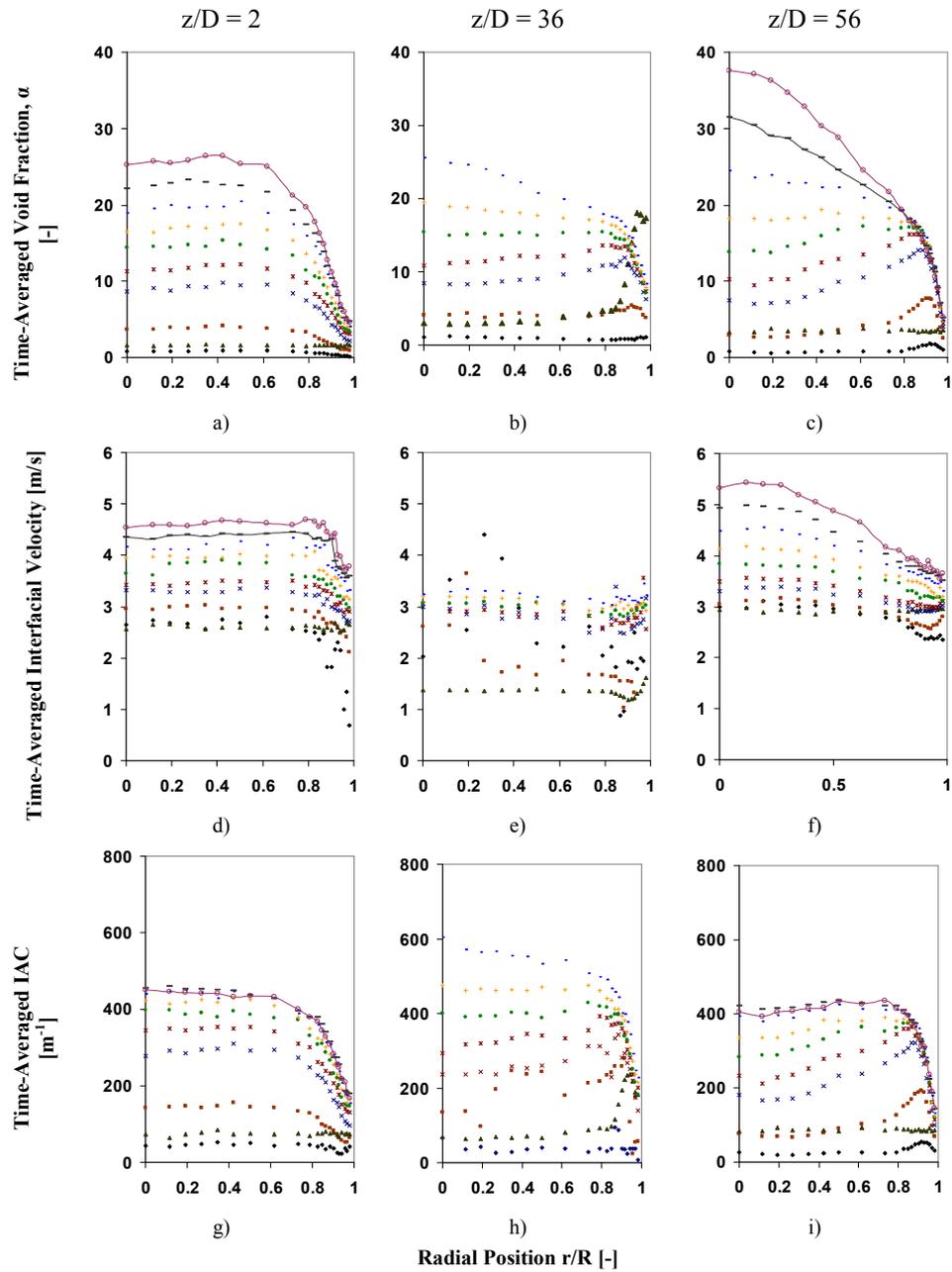


Figura A.4 Ensayo A para $j_f = 3.0$ m/s