



01173
2es.

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

**"APLICACION DE UN VELOCIMETRO LASER DOPPLER
A LA MEDICION DE UN CHORRO TURBULENTO
CON PARTICULAS EN SUSPENSION"**

T E S I S

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA**

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE**

MAESTRO EN INGENIERIA MECANICA

ING. ERNESTO MANERO BRITO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, 1989

**TESIS CON
FALLA DE GRADO**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PREFACIO

El estudio de flujos con partículas en suspensión es un tema de gran interés en el campo de la investigación en Mecánica de Fluidos, debido a sus múltiples aplicaciones en los procesos industriales modernos. Entre éstas podemos mencionar la combustión de sólidos en calderas de generación de vapor, el transporte de materiales granulares, los problemas de erosión y corrosión en ductos y canales, la dispersión de contaminantes en la atmósfera, ríos y mares, etc. El desarrollo de teorías y modelos que describen el comportamiento de estos flujos requiere datos experimentales que son, en general, muy difíciles de obtener. Sin embargo, el avance reciente de los instrumentos de medición, como es el caso del velocímetro láser-Doppler, permite en la actualidad medir velocidades medias, intensidades de turbulencia y concentraciones en este tipo de flujos.

La presente investigación se desarrolló dentro del marco del proyecto "Transferencia de Calor y Masa en Flujos Bifásicos con Partículas en Suspensión", que llevan a cabo conjuntamente el Instituto de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Erlangen, República Federal Alemana, y el Departamento de Fluidos y Térmica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la dirección de los Dres. Franz Durst y Jaime G. Cervantes de Gortari. El trabajo recopila los resultados obtenidos por el autor durante su estancia en la mencionada institución alemana (1985-1986). Estos resultados han sido presentados en dos congresos internacionales y en el de la Academia Nacional de Ingeniería, A.C. en 1987 (ver referencias del autor). Además, fueron discutidos como uno de los tres casos de estudio durante la Cuarta Conferencia Internacional sobre Modelado de Flujos Bifásicos, llevada a cabo en la Universidad de Erlangen del 21 al 23 de octubre de 1987. La dirección de la presente tesis estuvo a cargo del Dr. Jaime G. Cervantes de Gortari, a quien debo mi más profundo agradecimiento. La supervisión de los experimentos la realizó el Dr. Thomas Boerner.

El equipo experimental utilizado para este trabajo fue construido en Alemania en 1984 y adaptado por el autor para los experimentos realizados. Asimismo, cabe mencionar que este equipo ha sido donado por el Ministerio Federal para la Investigación y la Tecnología del mencionado país, a la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Actualmente se encuentra en el Laboratorio de Fluidos y Térmica de la misma.

Quiero agradecer a los Dres. Eduardo Ramos, Alejandro F. Romero López y Luis Dávalos, sus valiosos comentarios para conformar la presente tesis; al Centro de Estudios Nucleares de Karlsruhe, República Federal Alemana, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Universidad Nacional Autónoma de México, su soporte económico para la realización de este trabajo.

También expreso mi agradecimiento a las Compañías Turbinas y Equipos Industriales, Química SUMEX y a la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme brindado sus facilidades para la impresión del texto.

Ing. Ernesto Manero Brito.

Marzo de 1989.

INDICE

RESUMEN	v
RESUMEN (en idioma inglés)	vii
NOMENCLATURA	viii
1. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Alcance	1
1.3. Antecedentes bibliográficos	2
2. DESCRIPCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL	6
2.1. Sección de medición	6
2.2. Sistemas de generación de flujos	9
2.3. Sistemas de medición y control	11
2.3.1. El velocímetro láser-Doppler	11
2.3.2. Medición de presiones	11
2.3.3. El sistema de control de flujo	13
2.3.4. El sistema de control de temperatura	15
3. PROCESAMIENTO DE SEÑALES	17
3.1. El sistema de procesamiento de señales	17
3.2. Los criterios de discriminación de las fases	18
3.3. Comprobación experimental de los criterios de discriminación	24
3.4. Cálculo de la concentración por medio del velocímetro láser-Doppler	34
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	36
4.1. Mediciones de flujos en una fase	39
4.2. Mediciones de flujos con partículas en suspensión	46
4.3. Mediciones de presión	55
5. CONCLUSIONES	57
5.1. Técnica experimental	57
5.2. Resultados experimentales	59
5.2.1. Mediciones en una fase	59
5.2.2. Mediciones en dos fases	61
5.3. Futuras investigaciones	62
REFERENCIAS	63

APENDICES	66
I. EL VELOCIMETRO LASER DOPPLER	66
1. El efecto Doppler y su aplicación a la anemometria láser Doppler	67
2. El modelo de las franjas de Moire	72
II. MODELO PARA LA DETERMINACION DE LA VISIBILIDAD	75
III. PROGRAMAS DE COMPUTO	79
1. Subrutina Amp 2	79
2. Programa EM01	86
3. Programa EM03	88
IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES	100
V. FOTOGRAFIAS DEL EQUIPO EXPERIMENTAL	125

RESUMEN

Utilizando un velocímetro láser-Doppler convencional con procesamiento digital de señales, se estudian flujos de aire con partículas de sílice en suspensión de 50×10^{-6} m de diámetro medio y a concentraciones muy bajas (fracción volumétrica = 9.3×10^{-7} m³/m³).

Se desarrolla una técnica basada en los principios descubiertos por Durst & Zaré (1975), para la medición de todo tipo de flujos con partículas en suspensión con distribución de tamaños conocida, a bajas concentraciones y que permitan el uso del velocímetro láser-Doppler convencional. La discriminación de la información proveniente de cada una de las dos fases presentes en el flujo se basa en las características cualitativas de la señal Doppler: amplitud máxima y visibilidad. Se desarrolla un estudio teórico y experimental acerca de los efectos que tienen los parámetros geométricos y ópticos del sistema sobre estas variables y se dan los criterios básicos para la aplicación correcta del velocímetro. Además, se comprueba experimentalmente la efectividad de la discriminación de las fases por amplitud, visibilidad y amplitud y visibilidad simultáneas.

Se aportan resultados experimentales confiables que han servido y siguen siendo útiles para el desarrollo de modelos de cálculo de flujos con partículas en suspensión. Estos resultados se obtuvieron en flujos ascendentes en un canal vertical de 1.40 m de longitud, sección transversal rectangular (0.25 X 0.025 m) y con una entrada formada por tres subcanales que confluyen a la sección de medición.

Para caracterizar el campo de flujo, se realizan dos series previas de experimentos en ausencia de partículas con condiciones diferentes de velocidad a la entrada de la sección de medición. Se miden los valores medios y rms del componente de la velocidad en dirección del flujo. Se obtienen los perfiles para estas variables y se comparan con resultados de experimentos similares reportados en la literatura, identificándose la zona de turbulencia desarrollada y subcapa viscosa, de acuerdo con la definición de Laufer (1954). Además, se discute el desarrollo del flujo analizando el efecto de la geometría del canal y de las condiciones experimentales sobre la forma de los perfiles de velocidad media y sobre la intensidad de turbulencia.

Se presentan los resultados de otras dos series de experimentos efectuadas bajo las mismas condiciones de

velocidad a la entrada del canal, pero con la presencia de las partículas de sílice dosificadas al subcanal central. Se grafican también los perfiles para los valores medios y rms del componente de la velocidad en dirección del flujo de ambas fases y para la fracción volumétrica. Se discute la influencia que tienen las partículas sobre el flujo de la fase continua y el efecto de la pared sobre la velocidad media e intensidad de turbulencia de ambas fases. Se analiza la interacción existente entre el fluido y las partículas en la longitud de desarrollo y se comparan los resultados obtenidos con los de experimentos similares realizados con partículas de mayor diámetro (Milojevic et al. (1986)). Se proporcionan ideas que procuran la explicación de los mecanismos responsables del movimiento y dispersión de las partículas y se estudia la caída de presión medida en la pared del canal.

Por último, se presenta un resumen de las aportaciones principales del trabajo y se abren posibilidades para futuras investigaciones.

ABSTRACT

A conventional LDV-system and digital data processing are used to investigate low-concentration, gas-particle, two-phase flows (mean particle diameter = 50×10^{-6} m, volume fraction = 9.3×10^{-7} m³/m³).

This work presents a new measuring technique which is applicable to a wide range of low concentration two-phase flows of known particle size. This technique is based on the findings of Durst & Zaré (1975). The phase separation is carried out using the maximum amplitude and the visibility of the LDV-signal. The effects of the system's geometrical parameters on the signal characteristics are presented. Guidelines for the receiving optics design and an experimental comparison among amplitude, visibility and amplitude-visibility methods are also given.

The experimental results contribute to a better theoretical understanding and numerical modelling of these flows. These results were obtained in a flat vertical channel (length = 1.40 m, cross sectional area = 0.25×0.025 m) whose inlet section consists of three independent channels.

To characterize the air flow field and for the best understanding of the effects of the dispersed phase on this flow, it was necessary to carry out two previous single-phase experimental series under two different inlet velocity conditions. Mean and rms velocity profiles are compared to results reported in literature. The viscous sublayer and the fully developed turbulence region are identified (Laufer (1954)). The effects of the channel's geometry on the mean and rms velocity profiles are discussed. The development of the flow was also described.

Simultaneous measurements of gas and particle velocity, and local particle concentration are reported under the same inlet velocity conditions, but with spherical glass particles fed into the central inlet channel. The effect of the channel's wall on the flow, and of the particles on the continuous phase are described. Ideas are proposed to explain particle-fluid interaction and the mechanisms responsible of particle's movement and dispersion. Results are also compared to similar experiments with different particle size distributions (Milojevic et al. (1986)) and possibilities of future investigations are opened.

NOMENCLATURA

A	Área de la sección transversal (de tuberías)
Aa	1/2 de la altura de la apertura de la lente receptora
a	largo del generador de vibraciones (Fig. 2.3)
B	ancho de la sección de medición (Fig. 2.2.)
Ba	1/2 del ancho de la apertura de la lente receptora
b	largo de la base del generador de vibraciones (Fig. 2.3)
C	ancho de los canales laterales en $X = 0$, definido en la Fig. 2.2
c	largo de la mesa vibratoria (Fig. 2.3)
c	rapidez de propagación de la luz
D	ancho de la sección de prueba (Fig. 2.2.)
d	altura de la mesa vibratoria (Fig. 2.3)
dF	elemento diferencial de superficie dentro de la apertura de la lente receptora (Fig. II.2)
d _{lv}	diámetro del láser en el volumen de control
DN	diámetro nominal utilizado en tuberías
d _p	diámetro medio de las partículas que constituyen la fase dispersa del flujo
d _{max}	diámetro máximo de las partículas
d _v	ancho del volumen de control
E	ancho del canal central que desemboca en la sección de medición (Fig. 2.2)
e	altura del generador de vibraciones (Fig. 2.3)
F	espesor de las placas que dividen los tres subcanales que desembocan en la sección de medición (Fig. 2.2)

G	distancia definida en la Fig. 2.2
I_{ac}	$I_2 - I_1$, modulación de la señal Doppler
I_{ac}	amplitud de la modulación de la señal Doppler definida en la Fig. 3.2
I_a	nivel de voltaje seleccionado para discriminación por amplitud
I_0	constante de amplitud de la distribución de intensidad luminosa
I_1	amplitud de la señal Doppler definida en la Fig. 3.2
I_2	amplitud máxima de la señal Doppler (Fig. 3.2)
K_p	constante de amplificación del sistema de control de la válvula neumática
\vec{k}	vector que señala la propagación de la luz desde la partícula en movimiento hacia el fotodetector (Fig. 1.3)
L	longitud desde el centro del volumen de control al plano de la apertura de la lente receptora
\vec{l}	vector que indica la dirección de la propagación de la luz emitida por el láser (Figs. 1.1, 1.2 e 1.3)
l_{cc}	longitud del volumen de control
m	relación de apertura
\dot{m}	gasto másico de partículas (kg/s) (Fig.2.4)
m	relación de masas en el canal central
\dot{m}_g	flujo másico total de gas
\dot{m}_p	flujo másico total de partículas
\dot{m}_{pi}	flujo másico de partículas por localidad de medición
N	número total de puntos de medición a lo largo de un perfil de velocidad
N_r	número de franjas en el volumen de control

n_1	índice de refracción del medio en el que se propaga la luz (Fig. 3.4)
n_2	índice de refracción de la partícula (Fig. 3.4)
$P(\%)$	potencia relativa suministrada al dosificador de partículas (Fig. 2.4)
P	presión medida en la pared del canal
P_c	cantidad de luz que recibe el fotomultiplicador en una posición determinada de la apertura cuya forma es circular
P_s	cantidad de luz que recibe el fotomultiplicador en una posición determinada de la apertura cuya forma es rectangular
P_i	caída de presión en el orificio en mm columna de agua
P_o	presión medida en la pared del canal en X/D -3.2
R	radio de la esfera y/o partícula (Figs. 4.2, 4.3, etc.)
R_{ap}	radio de una apertura del lente receptor de forma circular
R_{ci}	frecuencia local relativa de pasaje de las partículas
Re	número de Reynolds; $Re = \rho U_o D / \mu$
R_i	frecuencia de pasaje de las partículas por cada localidad de medición
S	constante de baja frecuencia de la distribución de intensidad luminosa (ec. 4.2)
T_n	constante de tiempo de respuesta del sistema de control de la válvula neumática
t	tiempo
U	vector de velocidad
U_o	velocidad media total del aire
U_i	rapidez de movimiento del patrón de interferencia con respecto a la apertura

U_g	velocidad media del aire
$U_{g_{rms}}$	valor medio cuadrático (rms) de las fluctuaciones del componente de la velocidad del aire en dirección del flujo
U_p	velocidad media de la fase dispersa
U_{pi}	velocidad media de la partícula en la localidad de medición
$U_{p_{rms}}$	valor medio cuadrático (rms) de las fluctuaciones del componente de la velocidad de la fase dispersa en dirección del flujo
U_o	velocidad media total del aire
V_o	gasto volumétrico de aire en m ³ /s
V_{is}	visibilidad de la señal Doppler (Fig. 3.2)
V_{is_c}	nivel de discriminación por visibilidad
X_d	posición del centro de la apertura de la lente receptora
ΔX	distancia de separación entre franjas
ΔY	paso entre las localidades de medición en un perfil de velocidades

Letras griegas:

α	fracción volumétrica
α_i	fracción volumétrica en la localidad de medición
α_t	número de flujo DIN 1952 (1948)
e	número de expansión
η	constante de la alta frecuencia de la distribución de intensidad luminosa
λ	longitud de onda de la luz
λ_o	longitud de onda emitida por una fuente estacionaria
μ	viscosidad dinámica del aire

ν_a	frecuencia de la luz detectada por un observador estacionario
ν_p	frecuencia de la luz observada por un receptor en movimiento
ν_o	frecuencia de la luz emitida por una fuente estacionaria
ν_d	frecuencia detectada por el fotodetector
ρ_g	densidad del aire = 1.1307 kg/m ³ (29°C, 990 mbar)
ρ_p	densidad de la partícula
σ	desviación estándar
ϕ	ángulo formado por los rayos incidentes

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1. Objetivos.

Los dos objetivos principales de este trabajo son:

Desarrollar una técnica para el procesamiento de señales de un velocímetro láser-Doppler convencional, basada en los descubrimientos de Durst & Zaré (1975), para la medición de flujos con partículas en suspensión a concentraciones bajas y con distribución de tamaños conocida.

Aportar resultados experimentales que sirvan para la comprobación de teorías y de modelos que pretendan describir el comportamiento de flujos con partículas en suspensión. Estos resultados se deberán obtener adaptando el equipo experimental utilizado por Milojevic et al. (1986) y deberán complementar sus resultados.

1.2. Alcance.

En la parte inicial de la tesis se hace mención de las publicaciones más importantes que versan sobre las técnicas para medición de flujos con partículas en suspensión utilizando el velocímetro láser-Doppler, y de trabajos similares que reportan resultados experimentales de estos flujos en diferentes geometrías.

En el capítulo 2 se lleva a cabo la descripción del equipo experimental utilizado, incluyendo todos los sistemas de control y de medición, con excepción del sistema láser-Doppler, que se describe ampliamente en el capítulo 3. En este capítulo se discute además el procesamiento digital de las señales del velocímetro, y se establecen las dificultades existentes para la discriminación correcta de la información proveniente de cada una de las fases. Esta discriminación se efectúa identificando las características cualitativas (amplitud máxima y visibilidad) de las señales de ambas fases. Se presentan resultados teóricos y experimentales que determinan la dependencia de la amplitud máxima y de la visibilidad

de ciertos parámetros ópticos del sistema. Se determina la mejor técnica de discriminación y se proporcionan consejos prácticos para la instalación adecuada del velocímetro y para el ajuste del sistema de procesamiento de datos.

Los resultados experimentales obtenidos de flujos de aire ascendentes en una fase y con partículas en suspensión se presentan en el capítulo 4. Estos resultados se midieron en un canal vertical de 1.4 m de longitud, sección transversal rectangular (0.25 X 0.025 m) y con una entrada conformada por tres subcanales que terminan en la sección de medición. Se discuten las características fundamentales del flujo buscando explicaciones cualitativas respectivas a su comportamiento y se comparan con experimentos reportados anteriormente en la literatura, cuyas condiciones fueron similares (por ejemplo Lee & Durst (1982), Tsuji et al. (1984) o Milojevic et al. (1986)).

En la parte final se resumen las aportaciones principales de esta tesis y se delinearán futuras investigaciones.

Se anexan apéndices que complementan el contenido del trabajo y que abarcan lo siguiente:

la teoría básica del velocímetro láser-Doppler (apéndice I);

un modelo teórico desarrollado como parte de este trabajo, para determinar la dependencia de la visibilidad de la señal de determinados parámetros ópticos del velocímetro (apéndice II);

una descripción general de los programas y subrutinas de cómputo principales (apéndice III);

un listado de todos los resultados obtenidos en los flujos de aire en una y dos fases (apéndice IV);

y una colección de fotografías del equipo experimental.

1.3. Antecedentes bibliográficos.

La problemática principal que se presenta en la medición de flujos con partículas en suspensión por medio de un velocímetro láser-Doppler, es que el sistema de procesamiento de señales debe ser capaz de identificar las señales de las partículas que se utilizan como trazadores para detectar la velocidad de

la fase continua, de aquellas provenientes de las partículas que constituyen propiamente la fase dispersa del flujo. Para esto, es necesario estudiar la naturaleza física de la señal Doppler e intentar relacionar sus propiedades con el tamaño de la partícula que fluye a través del volumen de control del velocímetro.

Las ideas básicas para la medición de flujos bifásicos por medio del velocímetro láser-Doppler fueron descritas por Durst & Zaré (1975). Ellos demostraron que las ondas luminosas producidas por dos rayos láser al ser dispersados por la superficie de un cuerpo de gran tamaño, interfieren para formar franjas de diferente intensidad luminosa en el espacio. La localización y forma del patrón de interferencia dependen del arreglo de los rayos incidentes, de la forma del cuerpo y de su localización. Además, cuando el cuerpo se encuentra en movimiento, la rapidez con que se mueve el patrón de interferencia con respecto a un punto fijo en el espacio, está linealmente relacionada al componente de la velocidad del cuerpo reflejante que es perpendicular al eje de los dos rayos y que se sitúa sobre el plano formado por los mismos.

Ungut, Yule, Taylor & Chigier (1978) desarrollaron una técnica que establece que la amplitud de la señal Doppler es directamente proporcional al tamaño de la partícula que pasa a través del volumen de control. Sin embargo, la existencia de una distribución gaussiana de intensidad luminosa dentro de este volumen; el hecho de que no todas las partículas sigan la misma trayectoria; y la existencia de variables que son imposibles de controlar (p. ej. el ensuciamiento de las ventanas o lentes, etc.), provoca múltiples problemas en la interpretación de los resultados y conlleva errores cuantitativos considerables. Modarres, Tan & Elgobashi (1984) trataron de mejorar esta técnica reduciendo el tamaño efectivo del volumen de control por medio de la superposición de dos volúmenes, utilizando un velocímetro de dos colores y dos componentes. Hishida, Tajima & Maeda (1984) lograron también mejoras a esta técnica utilizando filtros para eliminar el efecto de la distribución de intensidad gaussiana. Desgraciadamente, ninguno de estos intentos lograron resultados cuantitativos satisfactorios o un rango de aplicación menos restringido.

Farmer (1972) investigó por primera vez el uso de la visibilidad de la señal Doppler con el mismo propósito (véase por ejemplo Durst et al. (1981)). El observó que la visibilidad describe un tamaño de partícula único, siempre que la relación del diámetro de la partícula entre la separación de las franjas del

patrón de interferencia dentro del volumen de control sea menor que la unidad.

Existen en la actualidad técnicas avanzadas para determinar con toda precisión distribuciones de tamaño de partículas utilizando el velocímetro láser-Doppler (Saffman et al. (1984)). Estas técnicas tienen como base los descubrimientos de Durst & Zaré (1975) y ya han sido incorporadas a los equipos comerciales por las empresas fabricantes de estos productos. Como patrón de medición se utiliza la proporcionalidad existente entre el defasamiento relativo de dos señales provenientes de dos fotodetectores localizados a un cierto ángulo con respecto al eje óptico del sistema, y el tamaño de la partícula que pasa por el volumen de control. Su aplicación resulta, sin embargo, muy costosa ya que se requieren tres fotodetectores (uno como referencia) y un sistema de procesamiento de señales sumamente sofisticado.

El alcance del presente estudio no contempla la aplicación de técnicas tan complejas para separar la información de las dos fases, ya que se utilizó una distribución de tamaños conocida de antemano. Para ello se desarrolló un método confiable basado en la amplitud y visibilidad de la señal Doppler, que requiere de un velocímetro con un solo fotomultiplicador y de un sistema de procesamiento de señales mucho más sencillo.

En lo que respecta al estudio de los flujos con partículas en suspensión, existen numerosas investigaciones científicas recientes que tratan el tema de la dispersión de las partículas en flujos turbulentos y su respectivo modelado. La hipótesis en que se basan muchas de ellas es que las partículas interactúan con el fluido que las rodea, de tal forma que responden parcialmente a las fluctuaciones turbulentas del flujo, asemejándose este fenómeno a un proceso de difusión.

Snyder & Lumley (1971) y Wells & Stock (1983) llevaron a cabo algunos experimentos básicos, estudiando las trayectorias de partículas individuales utilizando técnicas fotográficas. Lee & Durst (1982) y Tsuji & Morikawa (1984) estudiaron flujos bifásicos sólido-gas en tubos verticales, empleando instrumentos experimentales modernos, como es el caso del velocímetro láser-Doppler. Sus resultados muestran el efecto de la aceleración de la gravedad sobre el movimiento de las partículas e indican una fuerte dispersión transversal debida a la turbulencia. Además, Lee & Durst (1982) definieron dos regiones

bien delimitadas para tratar el transporte de partículas en el flujo turbulento: una región dominada por las fluctuaciones turbulentas del flujo, en la cual la dispersión de las partículas es similar a un fenómeno de difusión; y una segunda región, en la que los remolinos turbulentos son tan pequeños que la interacción entre las partículas y el fluido es similar a la que se tendría con un flujo laminar, y que se sitúa en la región adyacente a la pared.

Los estudios realizados por Arnason (1982) y por Milojevic et al. (1986) son ejemplos de investigaciones en chorros con partículas confinados en canales de sección circular y rectangular respectivamente, donde se discute el fenómeno de la dispersión de las partículas en flujos turbulentos. Cabe mencionar que las mediciones de Milojevic et al. (1986) constituyen el antecedente inmediato a la presente investigación, ya que se llevaron a cabo en el mismo equipo y exactamente bajo las mismas condiciones experimentales, pero con partículas de diferente tamaño y diferente procesamiento de señales. En el capítulo 4 se discuten cualitativamente las diferencias principales observadas entre los resultados de Milojevic y los obtenidos en el presente estudio.

Con el propósito de mejorar los modelos para el cálculo de los flujos con partículas en suspensión, el Instituto de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Erlangen, República Federal Alemana, en conjunto con otras instituciones europeas, han organizado en los últimos años (1984, 1985, 1986, 1987) una serie de conferencias internacionales en donde se han discutido resultados experimentales obtenidos por diversos autores (ver referencias). En la Segunda Conferencia Internacional sobre Modelado de Flujos Bifásicos (1985), se tomaron, por ejemplo, como casos de estudio los trabajos de Tsuji & Morikawa (1984) y de Milojevic et al. (en ese entonces todavía no publicado). Los resultados del presente estudio ya se han utilizado para este propósito durante la Cuarta Conferencia Internacional sobre Modelado de Flujos Bifásicos (1987) y han servido para mejorar estos modelos de cálculo, cumpliendo con uno de sus objetivos.

CAPITULO 2

DESCRIPCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

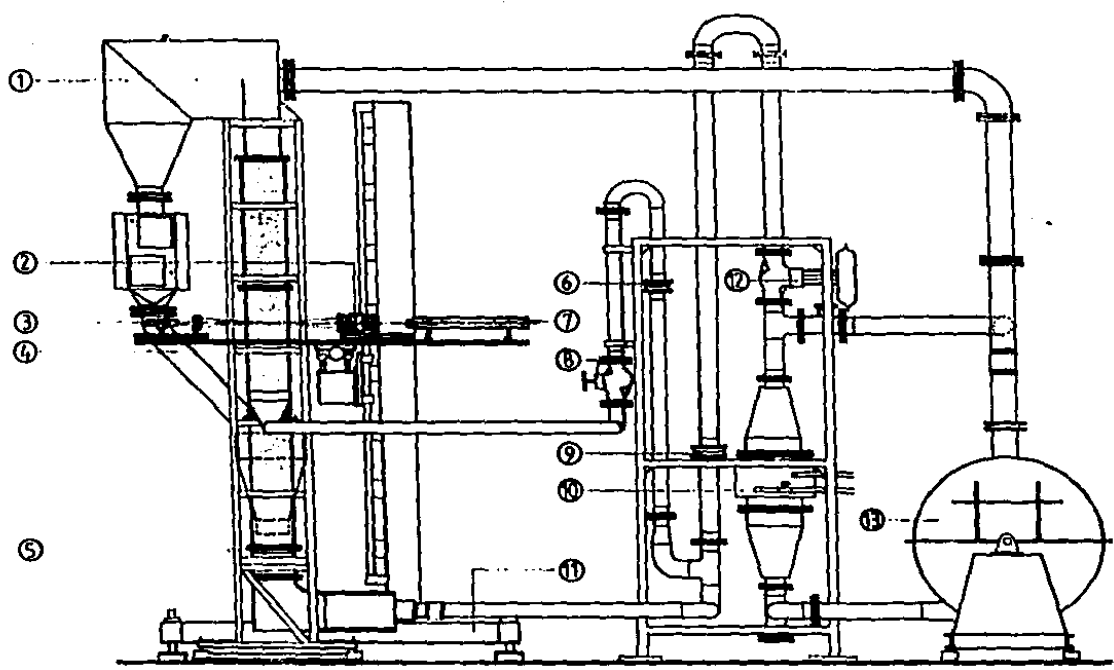
El equipo experimental utilizado en el presente estudio fue construido bajo los más altos estándares de calidad y se instaló en el Instituto de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Erlangen, R.F.A., bajo la supervisión de los Dres. Franz Durst y Thomas Boerner en el año de 1984. Después de una fase de pruebas (ver Bock & Boerner (1984)) que duró aproximadamente un año, se consideró que el equipo se encontraba en condiciones óptimas para la obtención de datos experimentales confiables. En la Fig. 2.1 se representan los diversos componentes del equipo experimental. Cabe mencionar que para los experimentos efectuados con partículas de 50×10^{-6} m de diámetro medio, fue necesario sustituir el ciclón (No. 1 de la Fig. 2.1) por un filtro colector de partículas. Esto se debió a que el ciclón no era capaz de separar partículas tan pequeñas de la corriente de aire.

Las unidades principales que constituyen al equipo son:

- 2.1 Sección de medición.
- 2.2 Sistemas de generación de flujos.
- 2.3 Sistemas de medición y control.

2.1 Sección de medición.

La sección de medición está formada por un canal plano con una sección transversal de 0.25×0.025 m y 2.20 m de longitud total. Para la configuración considerada en este estudio, el flujo total de aire se induce a la sección de medición en tres canales separados, los cuales contienen en su interior directores de flujo para la obtención de líneas de corriente aproximadamente paralelas. Las partículas de sílice, que forman la fase sólida del flujo, se suministran uniformemente a lo ancho del canal central. Después de una longitud de desarrollo de 0.8 m en cada uno de los tres canales, las placas de separación terminan en filo permitiendo la confluencia de los tres flujos con un mínimo de perturbaciones. La geometría de la sección de prueba se representa en la Fig. 2.2.



- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. Ciclón | 8. Válvula |
| 2. Optica transmisora | 9. Orificio para medición de flujo |
| 3. Optica receptora | 10. Intercambiador de calor |
| 4. Retorno de partículas | 11. Mecanismo para movimiento tri-dimensional del velocímetro |
| 5. Sección de medición | 12. Válvula neumática |
| 6. Orificio para medición de flujo | 13. Ventilador |
| 7. Láser | |

Figura 2.1. Equipo Experimental.

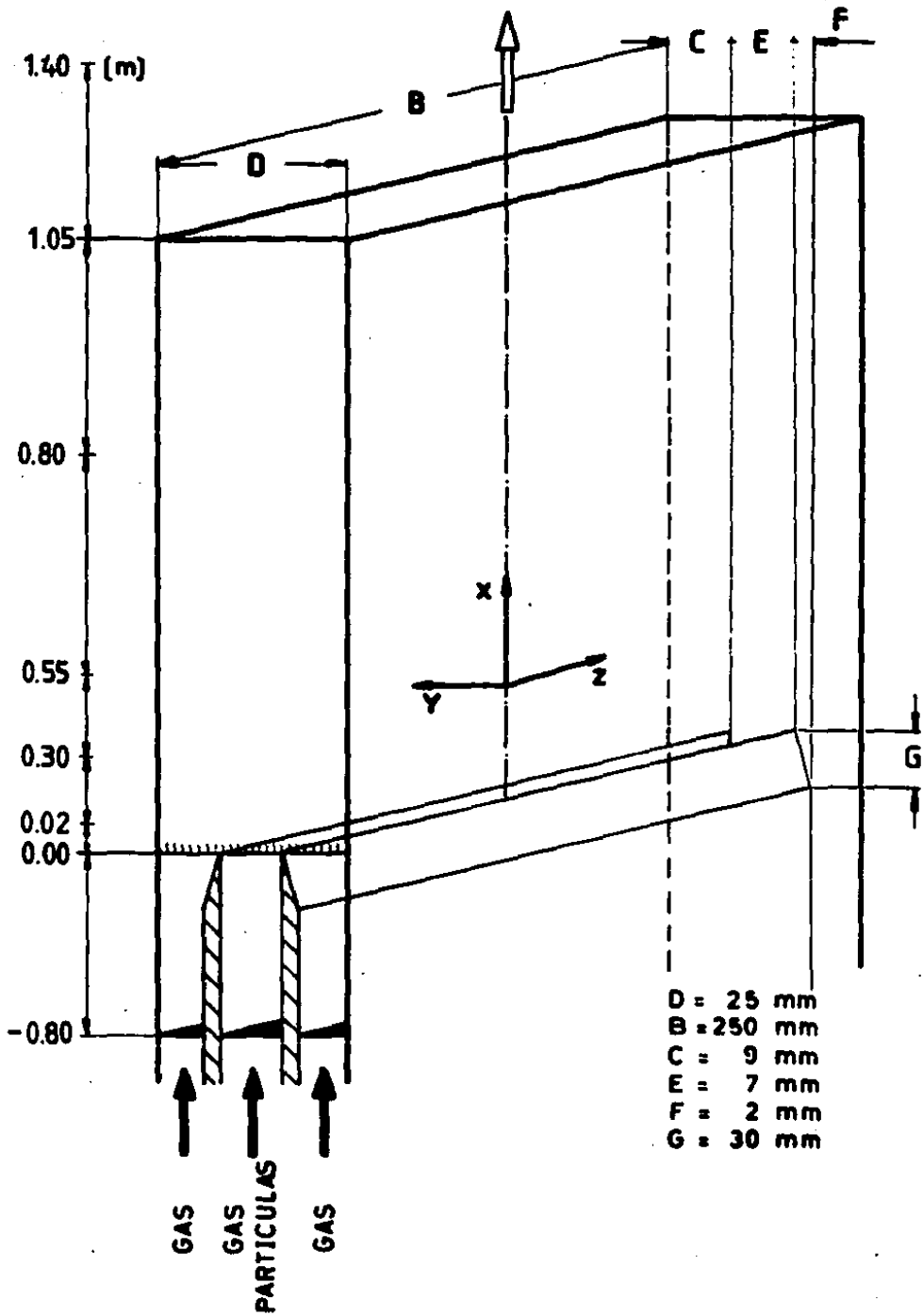


Figura 2.2. Sección de medición

2.2 Sistemas de generación de flujos.

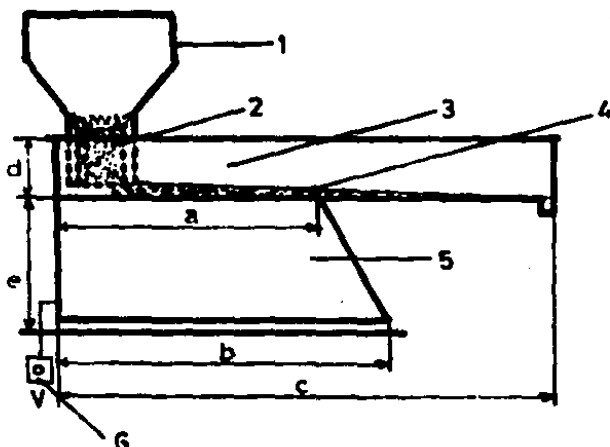
El flujo de aire se genera por medio de un ventilador accionado por un motor eléctrico de 18 kW, y capaz de producir una diferencia de presión de 250 mbar y un gasto volumétrico hasta de 0.1 m³/s.

La tubería que comunica las diversas partes del sistema fue diseñada para soportar una presión máxima de 6 bar. La corriente de aire a la descarga del ventilador fluye a través de un tubo de acero de 100 mm de diámetro nominal hacia el intercambiador de calor y posteriormente se divide en dos flujos, que respectivamente suministran aire al canal central de la sección de medición, (tubo de acero DN = 100 mm, localizado en la parte inferior), y a los canales laterales (tubo de acero DN = 80 mm y mangueras flexibles de 90 mm de diámetro). Inmediatamente después del intercambiador de calor, y comunicando a manera de libramiento a los flujos de descarga y de retorno del ventilador, se encuentra un tubo de acero DN = 80 mm.

Para evitar el calentamiento continuo del flujo, (que alcanzaba temperaturas hasta de 110°C), se instaló un intercambiador de calor transversal (Halber W10-50 D7456.30.000), en el que se utilizaba agua de la red pública como fluido de enfriamiento.

El circuito que describe la fase sólida se inicia en la unidad de almacenamiento y de suministro de partículas. Esta unidad está formada por un recipiente de almacenamiento de las partículas, por un mecanismo para control del flujo de las mismas y por una mesa vibratoria de amplitud controlada para un esparcimiento homogéneo a lo ancho del canal. En la Fig. 2.3 se representa esquemáticamente esta unidad y en la Fig. 2.4 se puede observar su respectiva curva de calibración.

Las partículas sólidas se distribuyen y viajan a lo largo del canal vibratorio hasta caer por gravedad en forma de cascada hacia una tobera "Venturi", que se localiza en la parte inferior de la sección de medición. El vacío provocado por esta tobera se encarga de iniciar el transporte de las partículas en el flujo de aire y de la obtención de una distribución homogénea de la fase sólida. Este flujo se dirige luego hacia el canal central para desembocar en la sección de medición.



1. Recipiente de partículas
2. Controlador de flujo
3. Mesa vibratoria
4. Partículas
5. Generador de vibraciones
6. Control de amplitud

a = 480 mm
 b = 565 mm
 c = 945 mm
 d = 160 mm
 e = 210 mm



Figura 2.3. Unidad de almacenamiento y suministro de partículas.

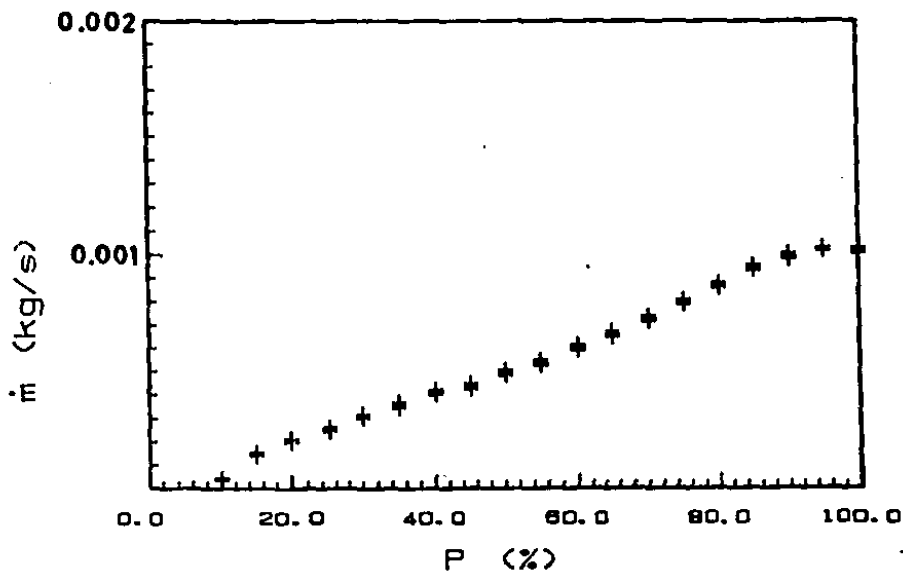


Figura 2.4. Curva de calibración del gasto de partículas.

2.3 Sistemas de medición y control.

2.3.1 El velocímetro láser-Doppler.

Para la medición de las velocidades medias de ambas fases, de los valores rms de sus fluctuaciones y de la concentración de partículas en el flujo, se utilizó en esta investigación un velocímetro láser-Doppler dual convencional.

La fuente del láser empleado es de tipo He-Ne, de 15 mW de potencia y las características del volumen de control son:

$d_{lv} = 219.45 \times 10^{-6} \text{ m}$ (diámetro del láser en el volumen de control)

$d_w = 220.21 \times 10^{-6} \text{ m}$ (ancho del volumen de control)

$l_w = 2.63 \times 10^{-3} \text{ m}$ (longitud del volumen de control)

$N_f = 58.0$ (número de franjas en el volumen de control).

En el apéndice I de esta tesis se presenta un resumen con la teoría básica del velocímetro láser-Doppler, que incluye la definición de los parámetros geométricos arriba mencionados.

2.3.2 Medición de presiones.

La sección de medición cuenta con una serie de orificios que permiten la medición de la caída estática en la pared conforme se va desarrollando el flujo.

Considerando el sistema de coordenadas presentado en la Fig. 2.2, la localización de los orificios era como sigue: $Z = 0$, $Y/D = 0.5$, $X/D = -3.2, 0.8, 8.8, 18.8, 28.8, 38.8, 50.0$.

En virtud de que las diferencias de presiones eran sumamente pequeñas, se requirió un micromanómetro diferencial de alta sensibilidad (Hoentzsch Messtechnik (0.02 - 100 mm columna de agua).

Como era de esperarse debido a la naturaleza turbulenta del flujo de estudio, el campo de presiones fue oscilatorio (Fig. 2.5). Para obtener valores medios confiables de la caída de presión, la señal de salida del transductor se

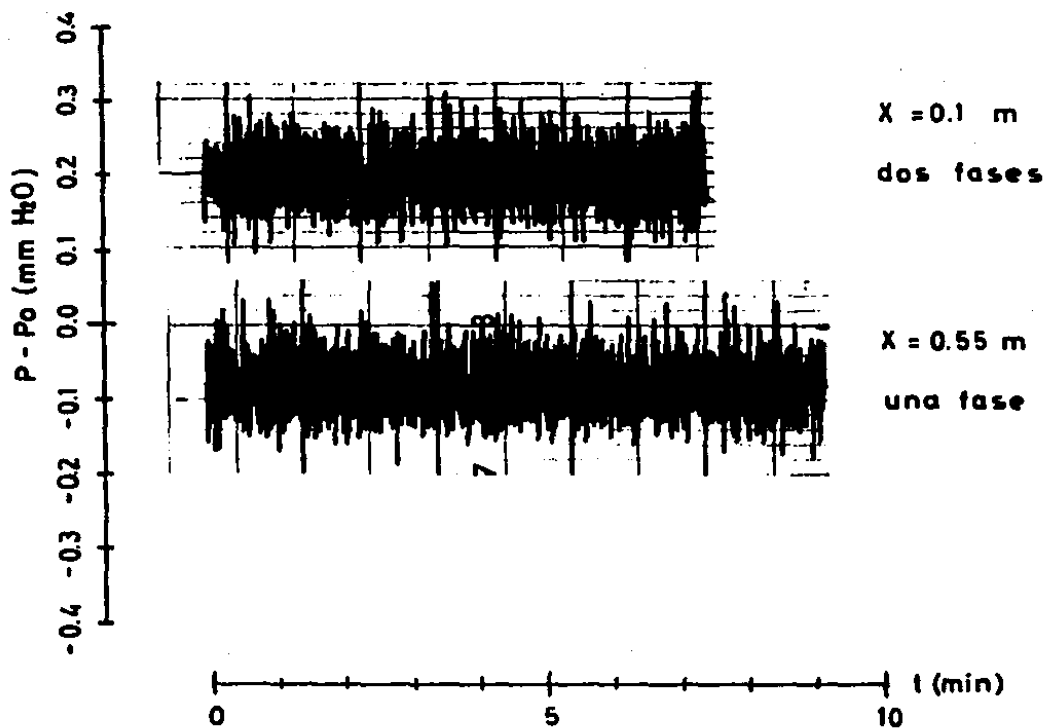


Figura 2.5. Gráficas típicas de la señal de salida del transductor de presión.

integró con respecto al tiempo con la ayuda de un graficador y/t. La integración se realizó de tal forma que las desviaciones posibles eran menores al 3% y los errores de lectura no sobrepasaron 0.2 Pa.

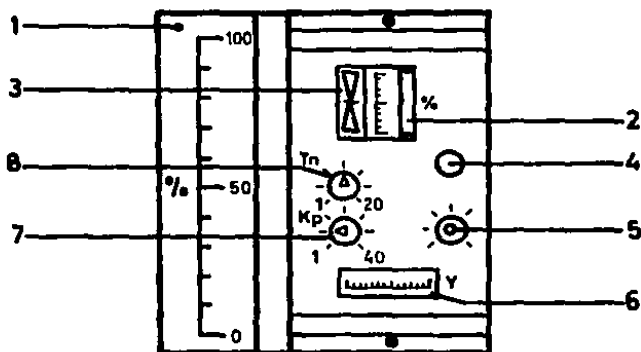
2.3.3 El sistema de control de flujo.

El flujo de aire en el sistema se controla por medio de dos válvulas y una compuerta, cuya localización se puede observar en la Fig. 2.1.

El flujo total que entra al sistema se determina a través de la caída de presión en el orificio de medición 1 (No. 9 de la Fig. 2.1), de acuerdo con las relaciones especificadas por las normas alemanas (DIN 1952 (1948)) para este tipo de medidores. De la misma forma, utilizando la caída de presión en la tobera de medición 2 (No. 6 de la Fig. 2.1), se determina la parte de la corriente total que fluye hacia los canales laterales de la sección de medición.

La caída de presión correspondiente al orificio 1 se conecta a un transductor de presión, del que se obtiene como salida una corriente eléctrica que varía entre 0 y 20 mA y que es la información requerida por la caja de control de la válvula neumática. En esta caja se utiliza esta señal para mostrar la cantidad de flujo que pasa a través de la válvula y para controlar el posicionador neumático inductivo de la válvula. El ajuste del caudal puede realizarse tanto manual como automáticamente. Para operación manual basta con posicionar la válvula por medio de la perilla respectiva mostrada en la Fig. 2.6. El ajuste automático se realiza seleccionando el flujo deseado a través de la rueda designada para dicho propósito (No. 2 de la Fig. 2.6). El tiempo y la amplitud de respuesta del sistema de control se deben ajustar para las condiciones de operación prestablecidas, por medio de las perillas señaladas con K_p y T_n respectivamente (Nos. 7 y 8 de la Fig. 2.6). Los valores de estos parámetros considerados como óptimos bajo las condiciones experimentales de este estudio fueron:

presión de la válvula:	1.20 bar;
constante de amplificación:	$K_p = 1.25;$
constante de tiempo de respuesta:	$T_n = 8.00.$



- | | |
|--|--|
| <p>1. Indicador de flujo</p> <p>2. Rueda para ajuste automático del flujo</p> <p>3. Indicador de la desviación (+- 12%) sobre el valor ajustado</p> <p>4. Interruptor para operación manual/automática</p> | <p>5. Perilla para posicionar manualmente la válvula</p> <p>6. Indicador de la posición de la válvula</p> <p>7. Tornillo para el ajuste de la amplitud de respuesta en operación automática</p> <p>8. Tornillo para el ajuste de la constante de tiempo de respuesta en operación automática</p> |
|--|--|

Figura 2.6. Placa frontal de la caja para control de la válvula neumática.

La cantidad de flujo que se dirige hacia los canales laterales de la sección de medición puede controlarse por medio de la válvula manual señalada con el No. 8 de la Fig. 2.1.

Para el cálculo del caudal que pasa a través de cualquiera de los dos orificios se utilizan las siguientes relaciones de acuerdo con DIN 1952 (1948):

$$V_g = m \alpha_t \epsilon A (2/\rho_g p_t)^{0.5} \quad (2.1)$$

O bien, para una cantidad de flujo determinada, se debe obtener la siguiente caída de presión en el orificio:

$$p_t = (V_g^2 \rho_g) / m^2 \alpha_t^2 \epsilon^2 A^2 2(9.90665) \quad (2.2)$$

En donde:

m	=	0.50	relación de apertura;
α_t	=	0.71	número de flujo (DIN 1952, (1948));
ϵ	=	1.00	número de expansión;
A	=	$5.04 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	área de la sección transversal (tubo NW 80);
A	=	$7.86 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	área de la sección transversal (tubo NW 100);
V_g	=		flujo de aire en m^3/s ;
ρ_g	=	1.13 kg/m^3	densidad del aire;
p_t	=		caída de presión en el orificio en mm columna de agua.

2.3.4 El sistema de control de temperatura.

Para la medición de la temperatura se utilizan tres termopares. Dos de éstos se encuentran situados a la entrada y a la salida del intercambiador de calor y el

tercero a la entrada de la sección de medición. De esta manera es posible cuantificar el enfriamiento provocado por el intercambiador y la temperatura media aproximada del flujo en la sección de medición.

El único dispositivo disponible para el control de la temperatura del flujo es el mencionado intercambiador de calor. La temperatura de operación en la sección de prueba fue de 31.2°C ($\sigma = 1.29$).

CAPITULO 3

PROCESAMIENTO DE SEÑALES

3.1. El sistema de procesamiento de señales.

En la Fig. 3.1 se muestra un diagrama de bloques de los principales componentes que constituyen el velocímetro láser-Doppler y el sistema de adquisición y procesamiento de datos empleados en este estudio. En ella se indica que la señal del fotomultiplicador se introduce a un filtro pasabandas (OEI-LD-E-310) con el propósito de obtener los componentes de alta y de baja frecuencia de la señal Doppler (ver Fig. III.1). El procesamiento de ambas señales se realiza por medio de una grabadora de transitorios de la marca Iwatsu mod. DM-902 y de una minicomputadora Hewlett-Packard HF-1000. La grabadora de transitorios se encuentra acoplada a la minicomputadora a través de una interfaz paralela mod. IOB-005-a, que permite el acceso directo a la memoria de la computadora (DMA). La grabadora de transitorios consta de un convertidor analógico digital extrarrápido y de una memoria digital de 8 bit X 2048 palabras. Haciendo uso del registro digital de cada señal, resulta posible la transmisión y procesamiento simultáneos de la información registrada en la memoria; es decir, que cada señal se digitaliza, se graba, se transmite a la memoria activa de la computadora y finalmente se procesa. La grabadora de transitorios Iwatsu DM-902 es capaz de alcanzar frecuencias de digitalización hasta de 100 MHz por canal, permitiendo medir flujos a grandes velocidades.

Para la detección de la velocidad del fluido se suministran en la corriente principal trazadores de CaCO_3 por medio de un alimentador de partículas de la marca OEI. Este suministrador garantiza un diámetro máximo de partícula $d_{\text{max}} = 4 \times 10^{-6}$ m. Según Durst & Ruck (1986), este tipo de trazadores siguen el movimiento del fluido de tal forma que resulta posible la medición de las propiedades turbulentas del flujo con gran precisión. La fase dispersa está constituida por las partículas de sílice, las cuales tienen un diámetro medio $d_p = 110 \times 10^{-6}$ m en los experimentos respectivos a este capítulo, y un diámetro medio $d_p = 50 \times 10^{-6}$ m en los del capítulo 4.

3.2. Los criterios de discriminación de las fases.

Uno de los puntos cruciales del procesamiento de señales es la discriminación de la información proveniente de los trazadores y de las partículas de la fase dispersa. En virtud de que en el flujo de estudio se conoce de antemano la distribución de tamaños de las partículas existentes (trazadores y partículas de sílice), es posible llevar a cabo dicha discriminación basados en las características cualitativas de la señal Doppler (amplitud máxima y visibilidad), de acuerdo con las definiciones de Durst et al. (1981), (ver Fig 3.2).

Las características cualitativas de las señales procedentes de los trazadores son :

amplitud modulada por un envolvente gaussiano, cuyo valor máximo es menor que el de las señales de las partículas bajo los mismos parámetros ópticos;

visibilidad igual o cercana a la unidad.

Las características cualitativas de las señales provenientes de las partículas son :

amplitud modulada por un envolvente gaussiano, cuyo valor máximo es mayor que el de las señales de los trazadores bajo los mismos parámetros ópticos;

visibilidad que puede variar desde valores cercanos a cero hasta la unidad, dependiendo de los parámetros ópticos del sistema. Esto se discute posteriormente.

El criterio de discriminación por amplitud tiene su fundamento en la diferencia existente entre las amplitudes máximas I_p que se obtienen respectivamente de las señales provenientes de los trazadores y de las partículas de la fase dispersa. Esta diferencia se debe, en términos generales, a que las partículas de gran tamaño dispersan una cantidad de luz mayor que los trazadores, provocando que sus señales tengan también una amplitud mayor. La discriminación por visibilidad, por su parte, se puede llevar a cabo si las visibilidades obtenidas de las señales de las partículas de la fase dispersa son menores que aquellas de los trazadores.

De acuerdo con lo anterior, se pueden establecer dos valores, uno para la amplitud máxima de la señal y otro para su visibilidad, I_p y Vis_p , respectivamente, tales que:

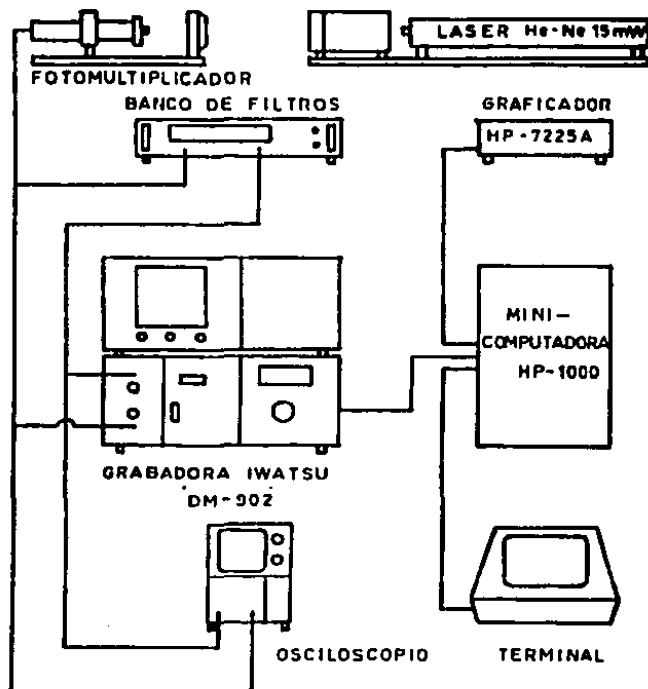


Figura 3.1. Sistema de anemometría láser-Doppler y de procesamiento de señales.

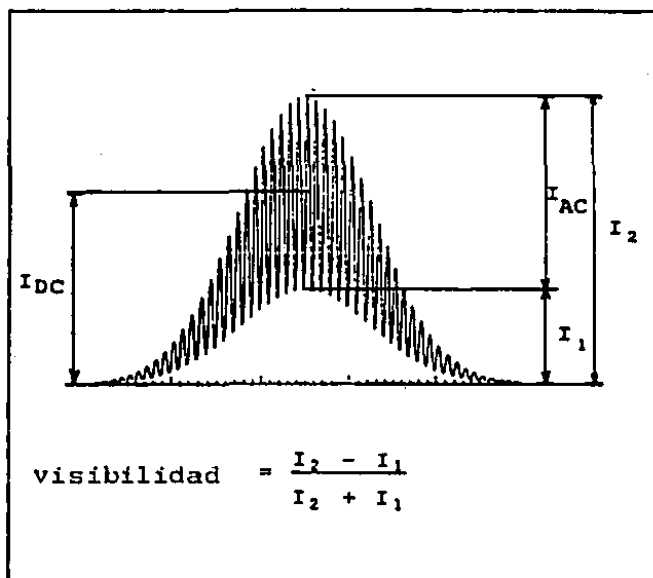


Figura 3.2. Señal Doppler.

para discriminación por amplitud:

si $I_s < I_e$ se trata de un trazador;
 si $I_s > I_e$ se trata de una partícula;

para discriminación por visibilidad:

si $Vis > Vis_e$ se trata de un trazador;
 si $Vis < Vis_e$ se trata de una partícula;

para discriminación por amplitud-visibilidad:

si $I_s < I_e$ y $Vis > Vis_e$ se trata de un trazador;
 si $I_s > I_e$ y $Vis < Vis_e$ se trata de una partícula.

La amplitud de la señal Doppler depende de la potencia del láser empleado; de las propiedades del fotomultiplicador; del tamaño de la partícula, de sus propiedades ópticas y de las del medio que la rodea; de la longitud de onda de la fuente luminosa; del ángulo entre los dos rayos incidentes; y del tamaño, forma y localización de las lentes receptoras. La amplitud depende también de parámetros que son difíciles de controlar, tales como la suciedad de las ventanas y la trayectoria de la partícula a través del volumen de control.

Los valores de visibilidad obtenidos de las señales Doppler de los trazadores se pueden explicar fácilmente mediante el modelo de las franjas de Moire descrito en el Apéndice I. En este modelo se establece la formación de planos de diferente luminosidad como resultado de los efectos constructivos y destructivos que tienen lugar al cruzarse dos ondas luminosas. La representación bidimensional de estos planos son franjas de diferente intensidad como las representadas en la Fig. 1.6. Cuando una partícula cuyo diámetro es menor o aproximadamente igual a la distancia de separación entre franjas, cruza perpendicularmente el volumen de control, ésta dispersa luz sólo cuando pasa por las franjas luminosas. Esto da como resultado una señal completamente modulada (visibilidad unitaria).

La visibilidad obtenida de las partículas de sílice es fuertemente dependiente de los parámetros ópticos del sistema. Para esclarecer esta dependencia fue necesario realizar, como parte de este trabajo, los experimentos que se describen a continuación:

La distribución luminosa producto de colocar partículas de sílice de diferentes tamaños en el volumen de control, se proyectó sobre un plano colocado perpendicularmente al eje óptico del sistema y a una distancia L del volumen de

control. El resultado fue un patrón de interferencia como el mostrado en la Fig. 3.3, en donde se pudo medir con gran precisión la separación entre franjas ΔX como función del diámetro de la partícula ($100 \times 10^{-6} < d_p = 2R < 980 \times 10^{-6}$ m) y de la longitud L. Estos resultados se presentan en la Fig. 3.4 y verifican la expresión analítica obtenida por Durst & Zaré (1975).

La Fig. 3.5 muestra los resultados de visibilidad obtenidos al mover una partícula de sílice de 100×10^{-6} a lo largo de una trayectoria que cruzaba por el centro del volumen de control. Esto se realizó utilizando un motor eléctrico de corriente directa, el cual hacía girar un disco sobre el que se colocó la mencionada partícula montada sobre una fibra óptica. Por enfrente de la lente receptora se instaló un diafragma a una distancia $L = 0.25$ m del volumen de control, que permitía variar el área de integración de la lente sobre la distribución luminosa reflejada por la partícula. En estos resultados se demuestra que las señales de partículas pueden ser completamente moduladas ($Vis = 1$), si el tamaño de la apertura se reduce hasta que integre menos de una franja del patrón de interferencia, considerando el espacio entre franjas definido en la Fig. 3.4. Al incrementar el radio de apertura del diafragma de tal forma que se integraran aproximadamente tres franjas, se observó que las partículas tenían visibilidades mucho menores que las obtenidas típicamente de los trazadores. En la misma Fig. 3.5, los resultados obtenidos se comparan con un modelo de integración basado en la expresión de ΔX obtenida por Durst & Zaré (1975) y que se describe con amplitud en el apéndice II de esta tesis. La concordancia entre resultados teóricos y experimentales es sólo cualitativa en virtud de las tolerancias mecánicas del equipo experimental y de que el modelo empleado es muy sencillo para tratar de describir un fenómeno óptico tan complejo.

Como conclusión de estos experimentos se puede afirmar que para realizar una discriminación por visibilidad efectiva, hay que garantizar que los parámetros ópticos del sistema permitan integrar el número de franjas necesarias para garantizar una visibilidad cercana a cero para las partículas de la fase dispersa, que se podrá diferenciar de la visibilidad casi unitaria obtenida de los trazadores. En nuestro caso, integrando sobre tres franjas se cumple esta condición (Fig. 3.5).

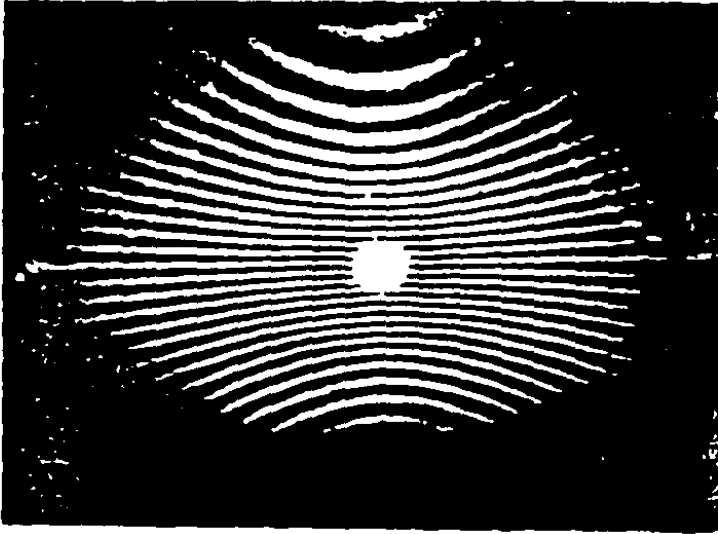


Figura 3.3. Proyección del patrón de interferencia sobre una pantalla localizada a una distancia L del volumen de control, cuando una partícula de sílice se encuentra en dicho volumen.

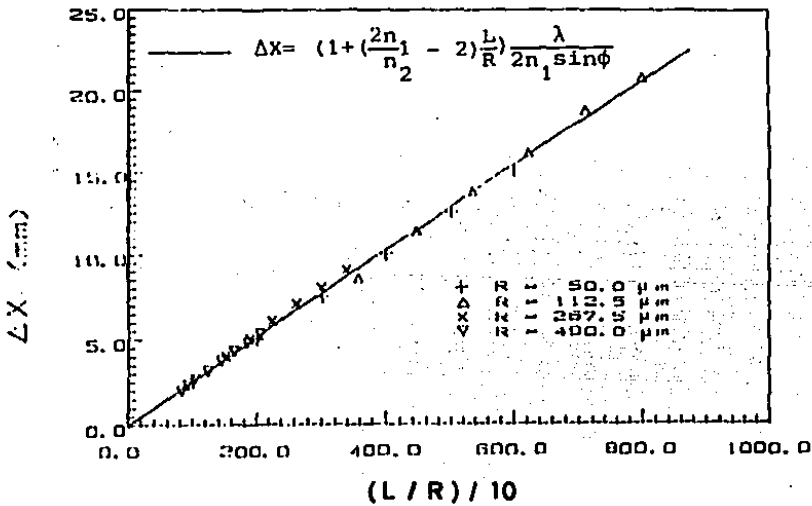


Figura 3.4. Espaciamento entre franjas para una partícula situada en el volumen de control.

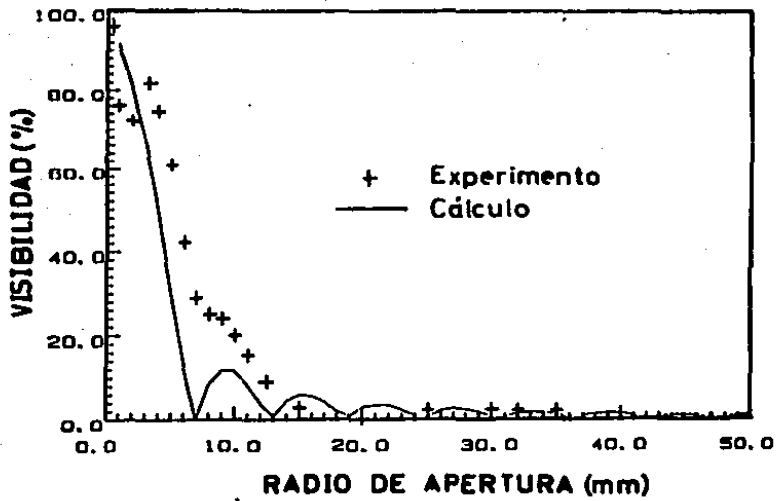


Figura 3.5. Resultados teóricos y experimentales de la variación de la visibilidad con respecto al radio de apertura de la lente receptora.

3.3. Comprobación experimental de los criterios de discriminación.

Se realizaron una serie de mediciones en el canal de prueba con el objetivo de verificar los criterios de discriminación. Estas mediciones se llevaron a cabo en el punto $X/D = 12$, $Y = 0$, $Z = 0$ (Fig 2.2). Para cada resultado que a continuación se discute, se procesaron 1000 señales del velocímetro. Los parámetros geométricos de la óptica receptora comprendían una distancia $L = 0.24$ m desde el volumen de control al plano sobre el que se encontraba la apertura de la lente receptora, cuya forma era en este caso rectangular con $2Ba = 0.05$ m de base y $2Aa$ de altura variable. (La forma rectangular de la apertura no tiene ninguna influencia sobre la visibilidad de la señal y permite integrar una cantidad de luz mayor, para obtener una mejor relación señal-ruido).

La Fig. 3.5 muestra la influencia del tamaño de la apertura sobre la distribución de probabilidad de la amplitud I_1 . Siguiendo la secuencia de 3.6A a 3.6D, resulta claro que conforme la apertura aumenta su tamaño, se obtienen frecuencias que corresponden a amplitudes cada vez mayores, y que la distribución de probabilidad se divide en dos dominios (Figs. 3.6C y 3.6D). La distribución de la Fig. 3.6D, que se refiere a la apertura de mayor tamaño, presenta frecuencias muy altas de amplitudes muy cercanas al voltaje máximo de salida del fotomultiplicador (1.2 V aproximadamente), lo cual indica que éste opera bajo condiciones de saturación, que no son recomendables desde el punto de vista técnico. Por su parte, en las distribuciones de las Figs. 3.6A y 3.6B se observan solamente amplitudes muy pequeñas, que indican que el fotomultiplicador recibe una cantidad de luz muy inferior a la de su rango normal de operación, ya que las aperturas son demasiado pequeñas. Las razones anteriores condujeron a la selección de la apertura de 13 mm de altura (Fig. 3.6C) para los experimentos posteriores.

En la Fig. 3.6C se presenta también la distribución obtenida del mismo flujo pero en ausencia de la fase dispersa, que se indica por medio de una línea discontinua. Para fines de comparación, los valores de probabilidad registrados se multiplicaron por un factor de ajuste. La superposición de ambas distribuciones pone de manifiesto que la parte plana de la curva continua, que se refiere a los valores mayores de la amplitud, se puede atribuir a la presencia de la fase dispersa del flujo. Esto da la oportunidad de establecer un valor de voltaje $I_1 = 0.28$ V, que podría conducir a una discriminación por amplitud confiable. El valor de 0.28 V se representa mediante la línea central de las tres líneas verticales discontinuas de la misma Fig. 3.6C; las otras dos, relacionadas con los

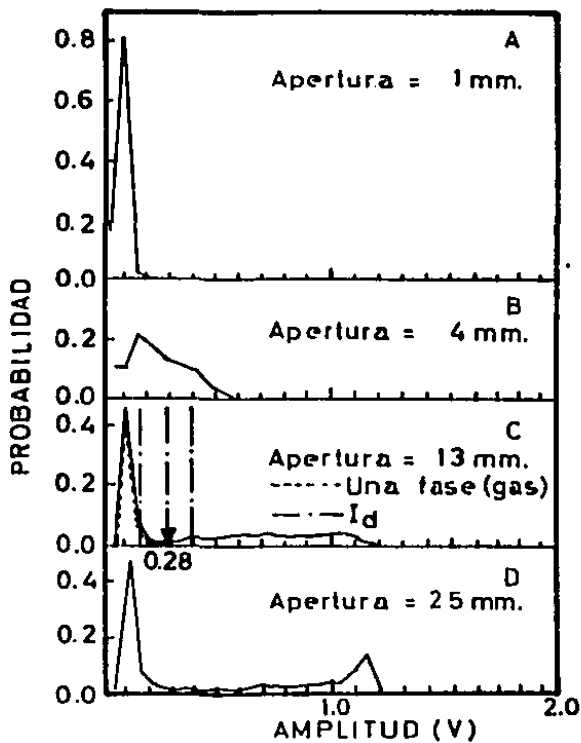


Figura 3.6. Efecto del tamaño de la apertura de la lente receptora sobre la distribución de probabilidad de la amplitud máxima de la señal Doppler, correspondiente a 1000 muestras para cada caso.

valores de 0.16 y 0.39 V, se escogieron también como valores de I_d con el fin de cuantificar la magnitud de los errores por una mala selección del nivel de discriminación.

La Fig. 3.7 muestra de manera similar a la figura anterior, la influencia de la altura de la apertura sobre la distribución de visibilidad de la señal. Para aperturas suficientemente pequeñas, (Fig. 3.7A), todas las señales, tanto de los trazadores como de las partículas, muestran valores altos de visibilidad. Al incrementarse el tamaño de la apertura, la visibilidad disminuye y se separa en dos dominios que se pueden atribuir a los dos tamaños de partículas presentes en el flujo, correspondiendo los valores de pequeños a las partículas de la fase dispersa y los grandes a los trazadores. En la Fig. 3.7C, se superponen la distribución de visibilidad escalada correspondiente al flujo en una fase (sólo aire) y la distribución del flujo con partículas, y se confirma la observación anterior. El comportamiento descrito por la secuencia de las Figs. 3.7A a 3.7D verifica los resultados teóricos y experimentales graficados en la Fig. 3.5. Como se mencionó en la sección anterior, esta figura muestra que la visibilidad para partículas de gran tamaño ($d_p = 110 \times 10^{-6}$ m) puede alcanzar valores elevados, si la apertura es suficientemente pequeña; y valores cercanos a cero, para aperturas mayores. Lo anterior corresponde con el comportamiento observado para las partículas de la fase dispersa en la secuencia de las figuras mencionada. En la Fig. 3.7C, se asignan tres niveles de discriminación ($Vis_d = 11, 15, 19\%$), representados también por líneas verticales discontinuas, siendo $Vis_d = 15\%$ el considerado como óptimo y representado por la línea central.

En la Fig. 3.8 se estudia la efectividad del criterio de discriminación por amplitud. La Fig. 3.8A muestra de manera equivalente a la Fig. 3.6C las distribuciones de amplitud obtenidas de dos flujos, uno monofásico y el otro con partículas, y el nivel de discriminación $I_d = 0.28$ V seleccionado. La Fig. 3.8B presenta la distribución de visibilidad resultante de los eventos cuya amplitud fue menor que I_d y la Fig. 3.8C la de los eventos cuya amplitud fue mayor. Además, en ambas figuras se marca con línea discontinua la distribución resultante del flujo monofásico. Si la discriminación fuera del todo efectiva, las distribuciones de la Fig. 3.8B deberían coincidir, ya que, de acuerdo con este criterio de discriminación, las señales con una amplitud menor que I_d deberían provenir de los trazadores que detectan la velocidad del gas, tratándose entonces de la misma información. Así mismo, en las distribuciones de la Fig. 3.8C no deberían existir puntos de cruce, ya que las distribuciones ahí graficadas

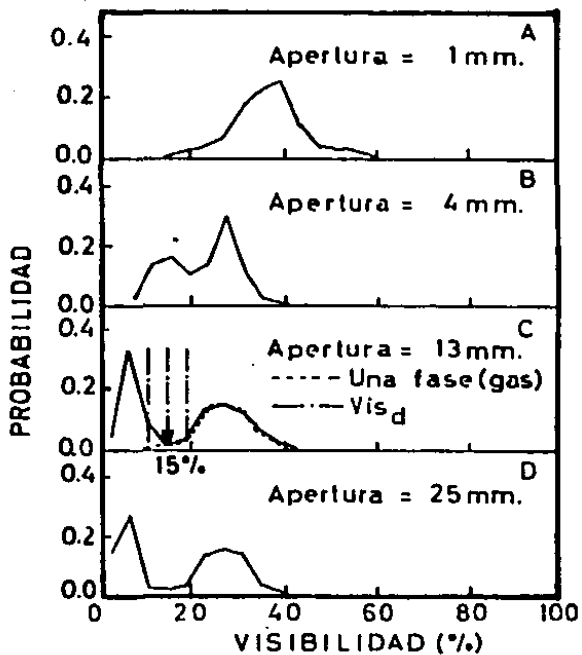


Figure 3.7. Efecto de la apertura de la lente receptora sobre la distribución de probabilidad de la visibilidad de la señal Doppler, correspondiente a 1000 muestras para cada caso.

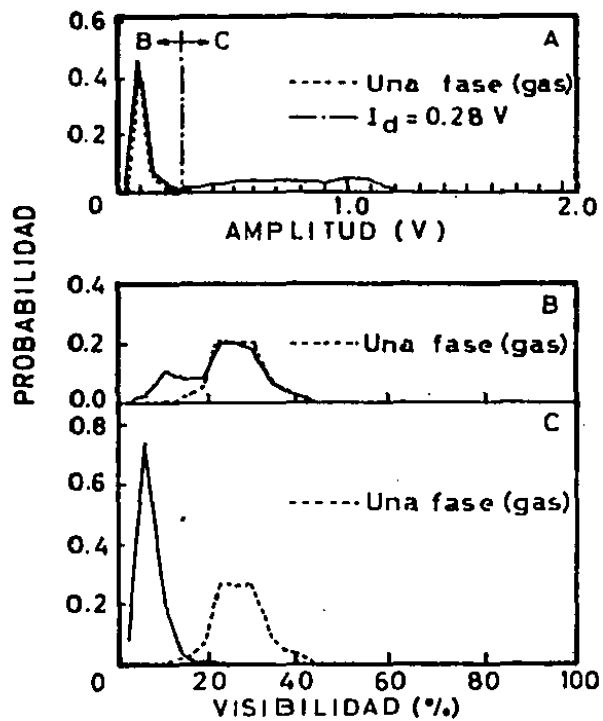


Figura 3.8. Prueba sobre la distribución de probabilidad de la visibilidad después de discriminación por amplitud.

representan la información proveniente de cada una de las dos fases. Los resultados experimentales muestran, sin embargo, que las dos distribuciones de la Fig. 3.8B no coinciden en los valores menores de la visibilidad y que las de la Fig. 3.8C se cruzan en un valor aproximado $Vis = 15\%$. Estas observaciones indican la existencia de una mezcla de los datos respectivos a cada fase, y demuestran que la discriminación basada solamente en la amplitud de la señal no es suficiente para separar correctamente la información de las dos fases.

Con el propósito de estudiar los errores que resultan de la selección incorrecta del nivel de discriminación por amplitud, se presentan en la Fig. 3.9 las distribuciones de probabilidad de las velocidades de ambas fases, que se obtuvieron utilizando tres valores diferentes de I_a . La Fig. 3.9A muestra superpuestas las distribuciones de probabilidad de amplitud para ambas fases y los tres valores de I_a seleccionados: $I_a = 0.16, 0.28$ y 0.39 V. En las Figs. 3.9B, 3.9C y 3.9D se grafican las distribuciones de velocidad de respectivas a los tres valores mencionados. Los resultados muestran que los valores medios no son sensibles a la selección de los diferentes niveles de discriminación. Sin embargo, el sesgo y la dispersión de las curvas sí presentan fuertes variaciones, sobre todo en las correspondientes a las velocidades del aire. Lo anterior implica que la elección incorrecta del valor de I_a afecta a los momentos de orden superior de las distribuciones de velocidad y, por lo tanto, a los resultados de sus valores rms, que son los parámetros que indican la intensidad de turbulencia del flujo.

La tabla 3.1 presenta los resultados experimentales obtenidos por medio de los tres criterios de discriminación. En la segunda columna se indica el tipo de discriminación empleada, en la tercera y cuarta se tabulan los niveles de discriminación utilizados, indicando todas sus combinaciones posibles para el caso de discriminación por amplitud y visibilidad simultáneas. Las cuatro siguientes columnas presentan las velocidades medias del fluido U_g y de la fase dispersa U_p , y los valores rms de dichas velocidades, $U_{g,rms}$ y $U_{p,rms}$.

Los resultados de discriminación por amplitud de la tabla 3.1 confirman las observaciones mencionadas para la Fig. 3.9: los valores medios presentan una desviación máxima menor al 2%, y los valores rms de la velocidad del gas alcanzan incertidumbres de +14.5% y -24.5% con respecto a los resultados con $I_a = 0.28$ V (nivel óptimo).

La discriminación por visibilidad, muestra también deficiencias en la medición de los valores rms de las velocidades, y nuevamente los errores máximos se observan en los respectivos al aire. En los resultados de la tabla

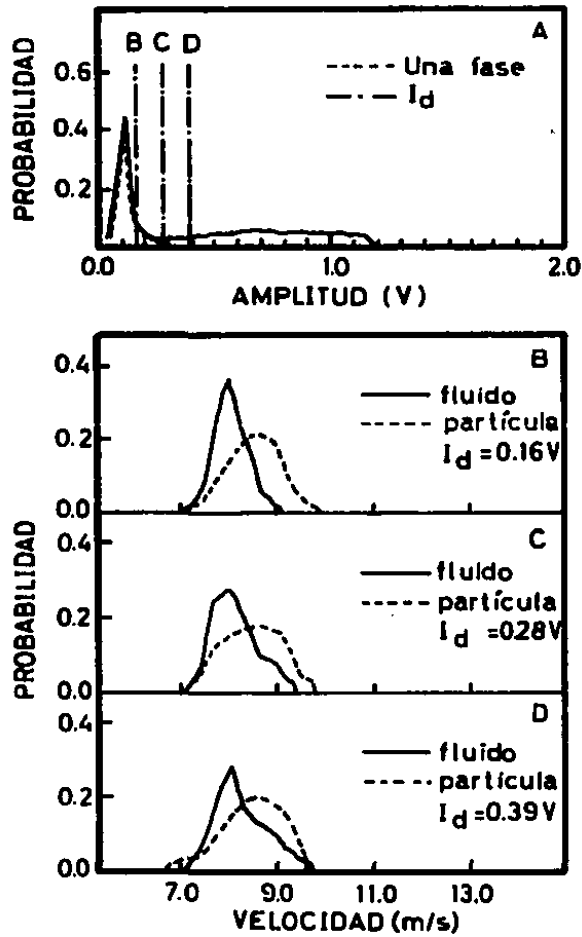


Figura 3.9. Discriminación por amplitud y sus distribuciones de velocidad resultantes.

Tabla 3.1. Resumen de los resultados de los diferentes criterios de discriminación.

No.	Criterio	I_e (Volts)	Vis_e (%)	Ug (m/s)	Ug_{res} (m/s)	Up (m/s)	Up_{res} (m/s)
1	A	0.16	-	7.9289	0.3439	8.3835	0.5529
2	A	0.28	-	8.0738	0.4559	8.4125	0.5883
3	A	0.39	-	8.1640	0.5221	8.4369	0.5795
4	V	-	11	8.0580	0.4479	8.3552	0.5712
5	V	-	15	7.9403	0.3710	8.3622	0.5665
6	V	-	19	7.9045	0.3230	8.3093	0.5520
7	A-V	0.16	11	7.8747	0.3219	8.3311	0.5474
8	A-V	0.16	15	7.8464	0.3291	8.2912	0.5683
9	A-V	0.16	19	7.8548	0.3377	8.3115	0.5739
10	A-V	0.28	11	7.9902	0.3682	8.5273	0.5958
11	A-V	0.28	15	8.0602	0.3854	8.5881	0.6120
12	A-V	0.28	19	7.9907	0.3715	8.4611	0.5787
13	A-V	0.39	11	7.8705	0.3329	8.3099	0.5748
14	A-V	0.39	15	7.9389	0.3468	8.4200	0.5846
15	A-V	0.39	19	7.8830	0.3464	8.4087	0.5278

A : Discriminación por amplitud.

V : Discriminación por visibilidad.

A-V: Discriminación por amplitud y visibilidad simultaneas.

3.1, las desviaciones de las medias no son mayores a un 1.5%, pero el rango de incertidumbre de los valores rms de la velocidad del aire es de +20.7% y -12.9%. Los valores anteriores, con respecto al obtenido con $Vis_a = 15\%$ que se considera como el valor óptimo.

Para comparar la efectividad de los criterios de discriminación por amplitud, visibilidad y amplitud y visibilidad simultáneos, en la Fig. 3.10 se presentan los resultados de velocidad obtenidos al aplicar cada uno de estos criterios por separado. En las Figs. 3.10A y 3.10B se grafican las distribuciones respectivas a la amplitud y a la visibilidad de las señales procesadas, y los niveles óptimos de discriminación ($I_a = 0.28 V$ y $Vis_a = 15\%$), que se utilizaron en estos experimentos. En las Figs. 3.10C, 3.10D y 3.10E se muestran las distribuciones de velocidad del fluido y de las partículas correspondientes a los tres criterios ya enunciados. Mientras que las distribuciones obtenidas para la velocidad de las partículas por medio de los tres criterios de discriminación no presentan cambios significativos, la curva de discriminación por amplitud respectiva a la velocidad del gas presenta una dispersión mayor que las correspondientes a los criterios de discriminación por visibilidad y por amplitud y visibilidad simultáneos. Esto indica una vez más, que existen problemas con las mediciones de los valores rms del aire, cuando se utiliza solamente discriminación por amplitud. Por otro lado, analizando los resultados de la tabla 3.1, se observa que la doble discriminación (amplitud y visibilidad simultáneas) disminuyó los errores provocados por la selección inadecuada del nivel de discriminación por visibilidad: con $I_a = 0.28 V$ fijo, el rango de incertidumbre para los valores rms del gas comprende sólo -4.5%, siendo el valor máximo el obtenido con $Vis_a = 15\%$. Este resultado es mucho mejor que el obtenido por visibilidad mencionado en el párrafo anterior. Sin embargo, las variaciones por la selección inadecuada del nivel de discriminación siguen provocando variaciones de -14.5% con respecto al resultado para $I_a = 0.28 V$, y $Vis_a = 15\%$ fijo.

Cabe mencionar que las mayores velocidades medias de las partículas que se observan en los resultados de las Figs. 3.9 y 3.10, es sólo una coincidencia y que esta observación se discutirá con amplitud en el siguiente capítulo.

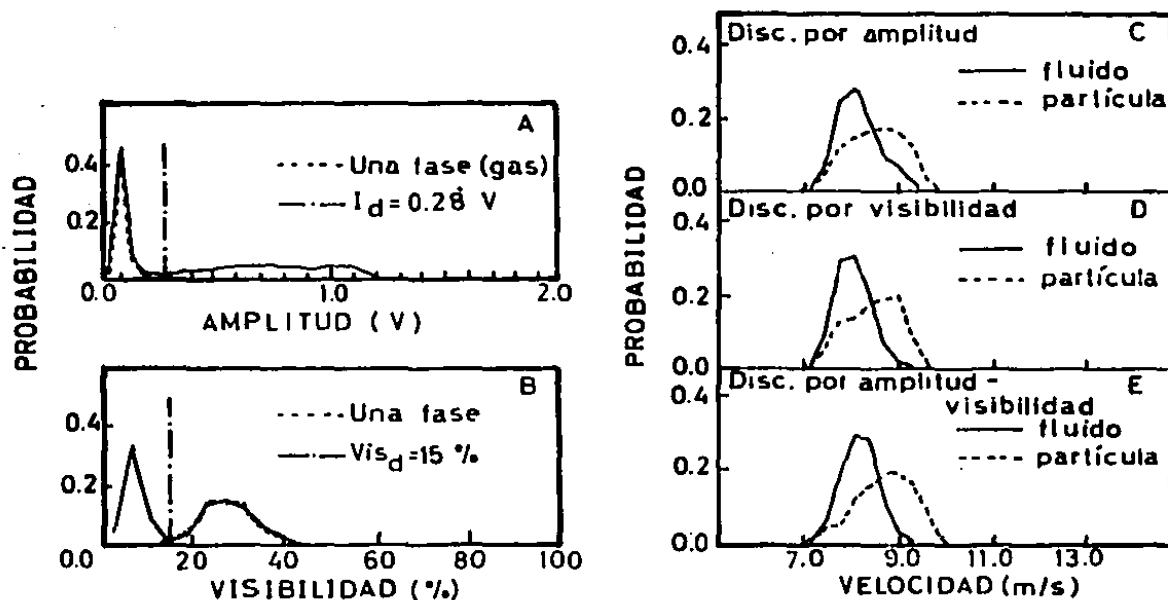


Figure 3.10. Comparación entre los criterios de discriminación por amplitud, visibilidad y amplitud-visibilidad.

3.4. Cálculo de la concentración por medio del velocímetro láser-Doppler.

La concentración local se determinó contando el número de partículas que pasaban por el volumen de control por unidad de tiempo. Esto fue posible gracias a la aplicación de un sistema formado por un discriminador electrónico por amplitud y por un contador. Cada vez que alguna señal del anemómetro tenía una amplitud $I_s > I_a$, el discriminador enviaba un pulso que era recibido por el contador, determinándose de esta forma la frecuencia local relativa de pasaje de las partículas, R_{ci} . El nivel de discriminación I_a fue seleccionado mediante pruebas repetitivas en flujos en una y dos fases.

El valor de R_{ci} se escaló para obtener el valor real de la frecuencia de pasaje de las partículas por cada localidad de medición:

$$R_i = R_{ci} (\Delta y_i B / (d_{vc} l_{vc})) \quad (3.1)$$

donde :

- Δy = paso entre las localidades de medición en un perfil de velocidades;
- B = ancho de la sección de medición;
- d_{vc} = diámetro del volumen de control;
- l_{vc} = longitud del volumen de control.

Utilizando la definición de R_i se puede calcular el flujo másico de partículas por localidad de medición como sigue:

$$\dot{m}_{pi} = R_i \dot{m}_p / \sum_{i=1}^N R_i \quad (3.2)$$

donde:

- \dot{m}_p = flujo másico total de partículas;
- N = número total de puntos de medición a lo largo de un perfil de velocidades.

Tomando en consideración la velocidad media de las partículas en cada punto de medición, es posible calcular la fracción volumétrica α_i a través de la siguiente expresión:

$$\alpha_i = m_{pi} / (\rho_p U_{pi} \Delta y_i B) \quad (3.3)$$

donde ρ_p es la densidad de la partícula.

CAPITULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Uno de los dos objetivos fundamentales de esta tesis es la obtención de resultados experimentales en un flujo bidimensional de aire con partículas de sílice en suspensión, con un diámetro medio de 50×10^{-6} m. (Ver Fig. 4.1). Como antecedente directo se debe mencionar el estudio realizado por Milojevic et al. (1986), que presenta resultados bajo condiciones experimentales similares, con una fase dispersa constituida también por partículas de sílice, pero con un diámetro medio de 110×10^{-6} m.

En este capítulo se discuten cuatro series experimentales realizadas con el equipo descrito en el capítulo 2 y utilizando la técnica de discriminación de las fases del capítulo 3 de este trabajo. Al igual que Milojevic et al. (1986), estas series se definieron variando las velocidades del flujo a la entrada de la sección de medición de acuerdo a las condiciones experimentales de la tabla 4.1 y al siguiente plan :

Mediciones en flujos en una fase.

Caracterización del flujo en ausencia de partículas por medio de la medición de perfiles de valores medios y rms del componente de la velocidad en dirección del flujo.

Serie 1 - caso de estudio 1:

la velocidad media inicial del gas en el canal central es aproximadamente igual a la de los canales laterales.

Serie 2 - caso de estudio 2:

la velocidad media inicial del gas en el canal central es mayor a la de los canales laterales.

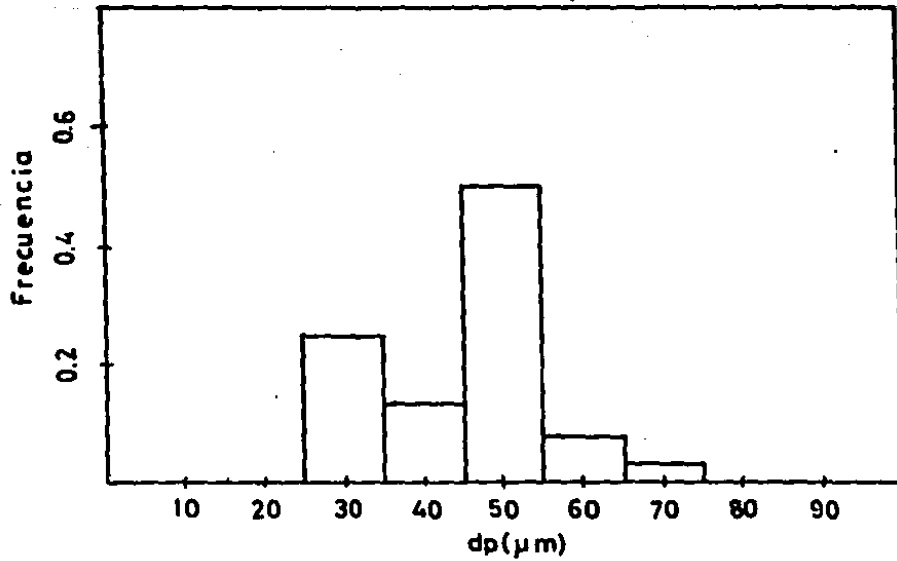


Figura 4.1. Distribución de tamaños de las partículas de sílice utilizadas para la realización de los experimentos en dos fases.

Mediciones en flujos con partículas en suspensión.

Obtención de perfiles para los valores medios y rms del componente de la velocidad en dirección del flujo para ambas fases, y para la fracción volumétrica.

Serie 3 - caso de estudio 1:

igual a la serie 1.

Serie 4 - caso de estudio 2:

igual a la serie 2.

Se habla de series de experimentos porque la medición de cada perfil que conforma a cada una de las cuatro series, representa un experimento de aproximadamente ocho horas de duración.

La bidimensionalidad del flujo se comprobó mediante los experimentos de Bock & Boerner (1984), quienes concluyeron que la relación de aspecto de 10 para la sección de medición, es suficiente para garantizar dicha condición.

Para determinar el número de señales Doppler que deben procesarse para la obtención de datos confiables de velocidad media y de su valor rms, Bock & Boerner (1984) efectuaron también una serie de mediciones, calculando la desviación estándar de los valores de velocidad registrados, como función del número de eventos. El resultado fue que 1000 señales Doppler para cada fase es suficiente para las mediciones de velocidad y 5000 eventos para la concentración. El tiempo de medición para obtener las 2000 muestras para la velocidad oscilaba alrededor de 20 minutos. Tomando en consideración que cada uno de los perfiles de velocidad que se presentan en este capítulo contiene 25 localidades, se obtienen tiempos de más de 8 horas para la medición de un solo perfil de velocidades, tal como se mencionó anteriormente.

4.1 Mediciones de flujos en una fase.

Con el propósito de estudiar los efectos que tiene la presencia de partículas sólidas sobre las propiedades del flujo de aire, se realizaron mediciones previas en ausencia de partículas, bajo las condiciones experimentales que también se especifican en la tabla 4.1. Se midieron perfiles de velocidad en $X/D = 0.0, 0.8, 4.0, 12.0, 32.0, 42.0$. De esta manera se obtuvo información suficiente para observar el desarrollo del perfil de velocidades a lo largo del canal. Los 25 puntos que conforman cada perfil están separados por una distancia de 0.001 m y se encuentran situados en el rango de $-0.48 < Y/D < 0.48$.

Los resultados de la velocidad media y de los valores rms del componente de la velocidad en la dirección del flujo, se presentan en las Figs. 4.2 y 4.3 para los casos de estudio 1 y 2 respectivamente. En ambas figuras, los perfiles localizados en la parte inferior corresponden a la entrada de la sección de medición, es decir, a $X/D = 0$, y los localizados en la parte superior a la salida, a $X/D = 42$.

Los perfiles de velocidades medias y de sus valores rms a la entrada del canal ($X/D = 0$) muestran las características típicas de tres flujos turbulentos desarrollados y son cualitativamente similares a los obtenidos por Laufer (1954) en un flujo turbulento de aire dentro de un tubo de sección circular (ver Fig. 4.4). Esto era de esperarse, ya que la sección $X/D = 0$ corresponde a la terminación de los tres subcanales independientes que desembocan en la sección de medición. La presencia de las paredes provoca que las velocidades medias sean muy bajas en la región adyacente a las mismas. Esto indica el cumplimiento de la condición de no deslizamiento en la pared. Los perfiles de los canales laterales obtenidos para el caso de estudio 2, presentan una región casi plana en el centro, que corresponde a la región de turbulencia desarrollada, según la definición de Laufer (1954). La intensidad de turbulencia aumenta gradualmente desde las líneas centrales de los canales hacia las paredes. Además, se observa que en el caso 2, los valores rms de las velocidades disminuyen bruscamente en $Y/D = 0.48$ y $Y/D = -0.48$, indicando que estos puntos se encuentran en la subcapa viscosa, que tiene un espesor mayor en este caso (cuando la velocidad del flujo es menor). Las observaciones anteriores concuerdan con los resultados de Laufer (1954), quien trabajando con $Re = 500,000$ y $Re = 50,000$, obtuvo también un incremento fuerte de la intensidad de turbulencia cerca de la pared y un espesor de la subcapa viscosa mayor, en el caso del Re más bajo, tal como se observa en la Fig.4.4.

Tabla 4.1. Condiciones experimentales para los casos de estudio 1 y 2.

	Caso de estudio 1	Caso de estudio 2
Número de Reynolds:	$Re = 13,009$	10,122
Velocidad media del gas en los canales laterales:	$U_g = 8.17 \text{ m/s}$	5.56 m/s
Velocidad media del gas en el canal central:	$U_g = 9.57 \text{ m/s}$	9.50 m/s
Velocidad media total del gas:	$U_o = 8.56 \text{ m/s}$	6.66 m/s
Gasto volmétrico del gas en el canal central:	$\dot{V}_g = 1.67 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$	$1.66 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$
Gasto volumétrico del gas en los canales laterales:	$\dot{V}_g = 3.68 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$	$2.50 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$
Relación de masas en el canal central:	$m = 2.09 \times 10^{-3} \text{ kg/kg}$	$2.1 \times 10^{-3} \text{ kg/kg}$
Gasto másico de partículas:	$\dot{m}_p = 3.95 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$	$3.95 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$
Gasto másico total del gas:	$\dot{m}_g = 6.05 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$	$4.71 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$
Fracción volumétrica en el canal central:	$\alpha = 9.25 \times 10^{-7}$	9.31×10^{-7}

Viscosidad dinámica del aire: $\mu = 18.6 \times 10^{-6} \text{ kg/ms}$

Densidad del aire: $\rho_g = 1.1307 \text{ kg/m}^3$

Densidad de las partículas: $\rho_p = 2,550 \text{ kg/m}^3$

Diámetro medio de las partículas: $d_p = 50 \times 10^{-6} \text{ m}$

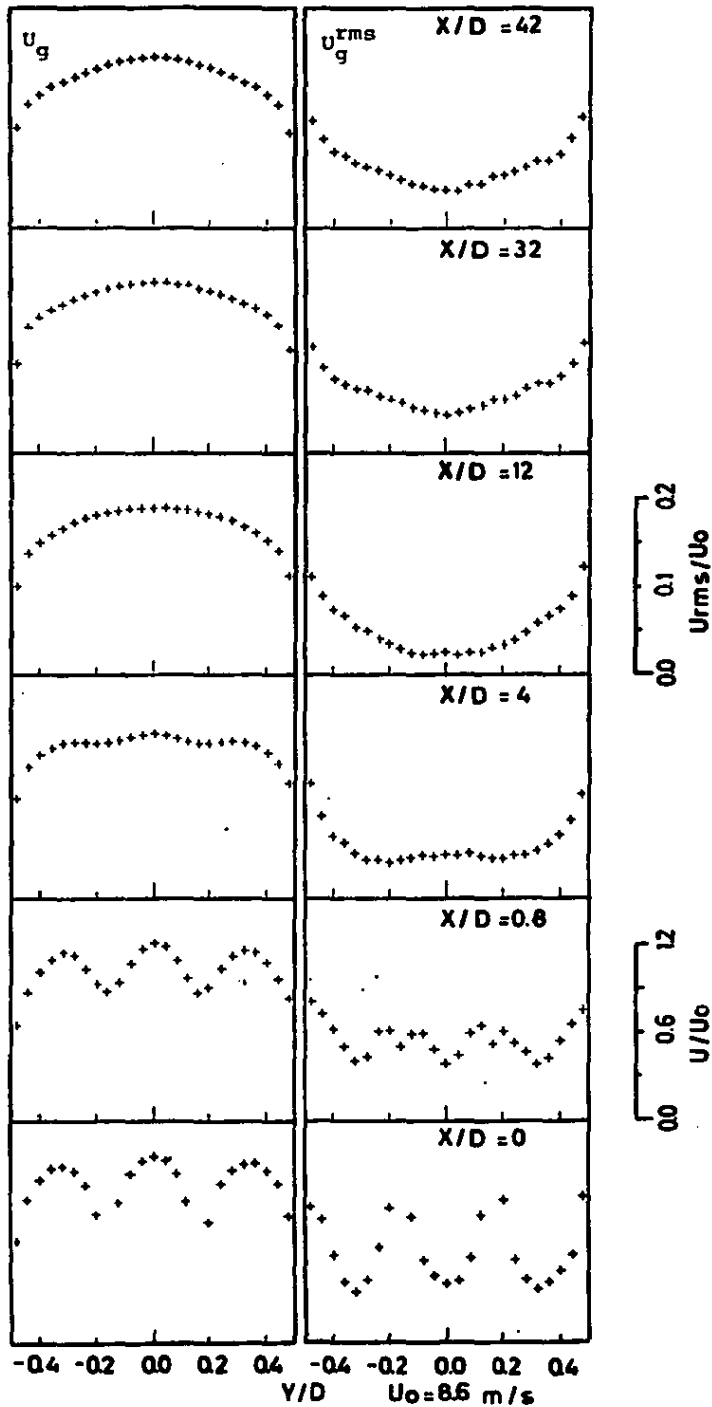


Figura 4.2. Resultados experimentales del flujo monofásico. Caso de estudio 1.

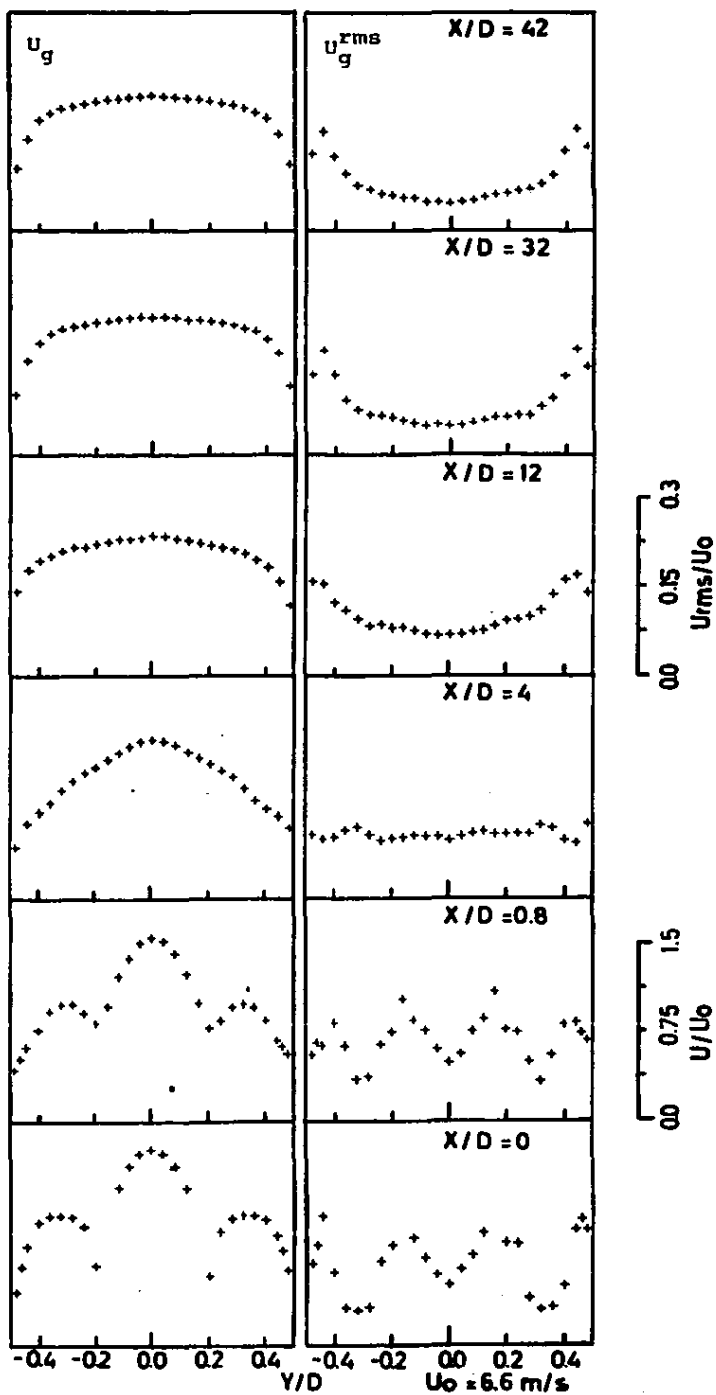
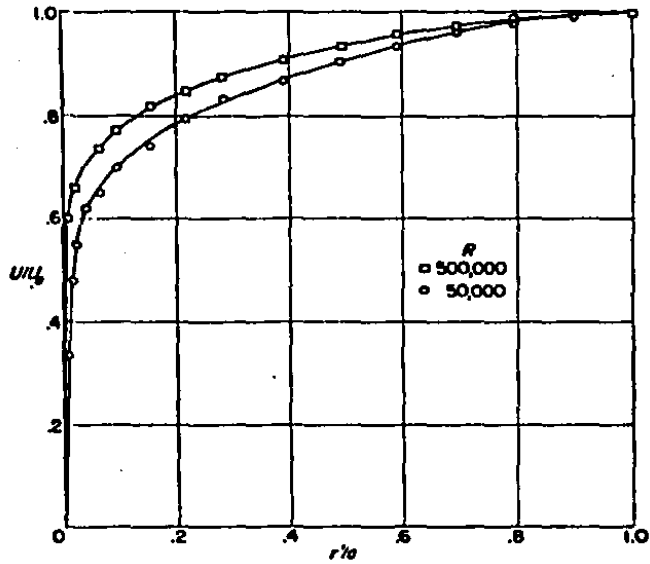
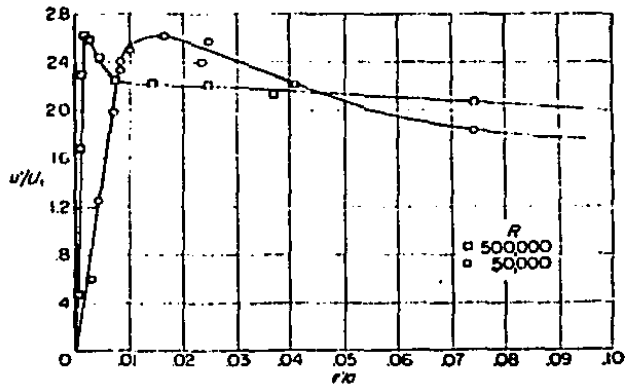


Figura 4.3. Resultados experimentales del flujo monofásico. Caso de estudio 2



Distribución de velocidad media.



Distribución de u'

Figura 4.4. Resultados obtenidos por Laufer (1954) en un flujo turbulento de aire dentro de un tubo de sección transversal circular.

El mezclado de los tres chorros que llegan a la sección de medición y el desarrollo del flujo a lo largo del canal dan como resultado los perfiles de velocidad media cuyas formas se observan en las secciones $X/D = 0.8, 4$ y 12 . En el caso 1, el perfil en $X/D = 12$ indica que el flujo es ya completamente desarrollado. Sin embargo, el correspondiente al caso 2, muestra lo contrario. Esto se debe a que en este caso el desarrollo del flujo es más lento, debido a que el mezclado de los chorros es más intenso en virtud de los mayores gradientes de velocidad existentes a la entrada del canal. A partir de $X/D = 32$, se puede decir que los flujos ya son desarrollados en ambos casos y son similares una vez más a los resultados de Laufer (1954). Nuevamente, para el caso de estudio 2, en los perfiles $X/D = 32$ y $X/D = 42$ se observa que en los puntos más cercanos a la pared ($Y/D = 0.48$ y $Y/D = -0.48$), la intensidad de turbulencia disminuye rápidamente, indicando que estos puntos están dentro de la subcapa viscosa, la cual tiene un espesor mayor que el del caso 1. Esto concuerda una vez más con los resultados de Laufer (1954).

Con el propósito de estudiar la forma en que varía la intensidad de turbulencia a lo largo del canal y de obtener de esta manera información de las regiones en donde las partículas estarán sometidas a un flujo más turbulento, se integraron los perfiles de velocidades rms y se calcularon los valores medios de esta variable en cada una de las secciones medidas. Para el caso de estudio 1 (ver Fig. 4.5), el valor medio máximo $U_{rms}/U_0 = 0.104$, se obtuvo en $X/D = 0.8$; luego, el valor mínimo $U_{rms}/U_0 = 0.058$, en $X/D = 12$; y finalmente, un valor constante $U_{rms}/U_0 = 0.079$, a partir de $X/D = 32$. Para el caso 2, el valor máximo $U_{rms}/U_0 = 0.138$ se obtuvo también en $X/D = 0.8$; pero a diferencia del caso anterior, este valor decrece suavemente hasta alcanzar un valor constante $U_{rms}/U_0 = 0.080$, nuevamente a partir de $X/D = 32$. El comportamiento observado en el caso de estudio 1, indica que la confluencia de los tres chorros provoca un incremento sensible del nivel de turbulencia (en $X/D = 0.8$); luego existe un abatimiento rápido de la producción de turbulencia que se puede atribuir a que el proceso de mezcla ha concluido; posteriormente, el flujo incrementa su turbulencia hasta que termina su desarrollo (en $X/D = 32$); y finalmente, cuando el flujo está completamente desarrollado, la intensidad de turbulencia se mantiene aproximadamente constante. En el caso 2, la turbulencia provocada por la mezcla de los chorros con un gradiente de velocidad mayor, se refleja en una intensidad de turbulencia más elevada en $X/D = 0.8$. El proceso de mezclado tan intenso combinado con el desarrollo del flujo no permiten observar un decremento rápido de la producción de turbulencia, sino una disminución gradual hasta que se alcanza la condición de flujo desarrollado en $X/D = 32$.

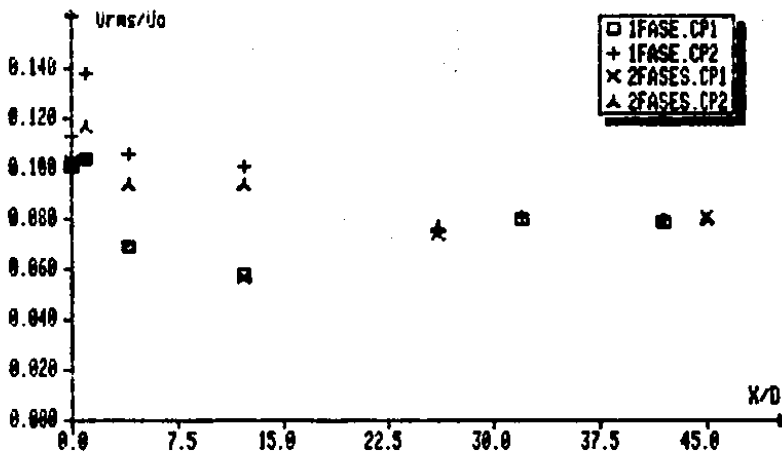


Figura 4.5. Valores medios de los perfiles de los valores rms de la velocidad del aire, para ambos casos de estudio y en flujos en una y dos fases.

4.2 Mediciones de flujos con partículas en suspensión.

Las condiciones experimentales de los dos casos de estudio especificados en la tabla 4.1 se mantuvieron constantes a lo largo de los experimentos realizados en esta sección. Las Figs. 4.6 y 4.7 presentan los resultados correspondientes a los casos de estudio 1 y 2 respectivamente. De izquierda a derecha se tienen, en la 1a. columna, los perfiles de velocidades medias del gas U_g y de la fase dispersa U_p ; en la columna central, los perfiles de los valores rms de las velocidades $U_{g,rms}$ y $U_{p,rms}$; y los resultados de la fracción de volumen α , en la 3a. columna. Las mediciones se realizaron en $X/D = 0, 0.8, 4.0, 12.0, 26.0, 45.0$, correspondiendo $X/D = 0$ con los perfiles localizados en la parte inferior de las figuras, y $X/D = 45.0$ con los localizados en la parte superior.

Los valores de la velocidad media del gas no presentan diferencias considerables con respecto a los obtenidos del experimento en una fase. Esto se puede corroborar comparando las formas de los correspondientes perfiles de velocidad de las Figs. 4.2 y 4.6, para el caso de estudio 1, y los de las Figs. 4.3 y 4.7., para el caso 2. Esta observación indica que la concentración de partículas fue muy baja como para alterar las velocidades medias de la fase continua.

La velocidad de deslizamiento ($U_g - U_p$) es positiva en la línea central del canal y negativa cerca de las paredes, es decir, las partículas son más rápidas que el gas en la subcapa viscosa y existe un punto en el que ambas fases tienen la misma velocidad. Este comportamiento se puede observar a la entrada ($X/D = 0$) y a partir de $X/D = 12$ para los dos casos de estudio. Lee & Durst (1982) obtuvieron resultados similares para partículas de 100×10^{-6} y 200×10^{-6} m de diámetro y Tsuji & Morikawa (1984) para partículas de plástico en el rango $200 \times 10^{-6} < d_p < 3 \times 10^{-5}$ m. Además, al comparar los resultados de este estudio con los de Milojević et al. (1986) que se muestran de forma análoga en las Figs. 4.9 y 4.10, se puede afirmar que el valor absoluto de la velocidad de deslizamiento es mayor para partículas más grandes y que el cambio de signo ocurre con mayor facilidad con partículas pequeñas. Esta observación concuerda también con los resultados de Lee & Durst (1982) y con los de Tsuji & Morikawa (1984). Este comportamiento se debe a que las partículas penetran en la subcapa viscosa con una velocidad mayor que la del fluido y no alcanzan a frenar para alcanzar una velocidad nula en la pared, sino que chocan y rebotan contra ésta. En otras palabras, que no cumplen con la condición de no deslizamiento en la pared. Además, las mayores diferencias de velocidad observadas entre las partículas y el fluido en el caso de partículas de mayor tamaño (como en el caso de

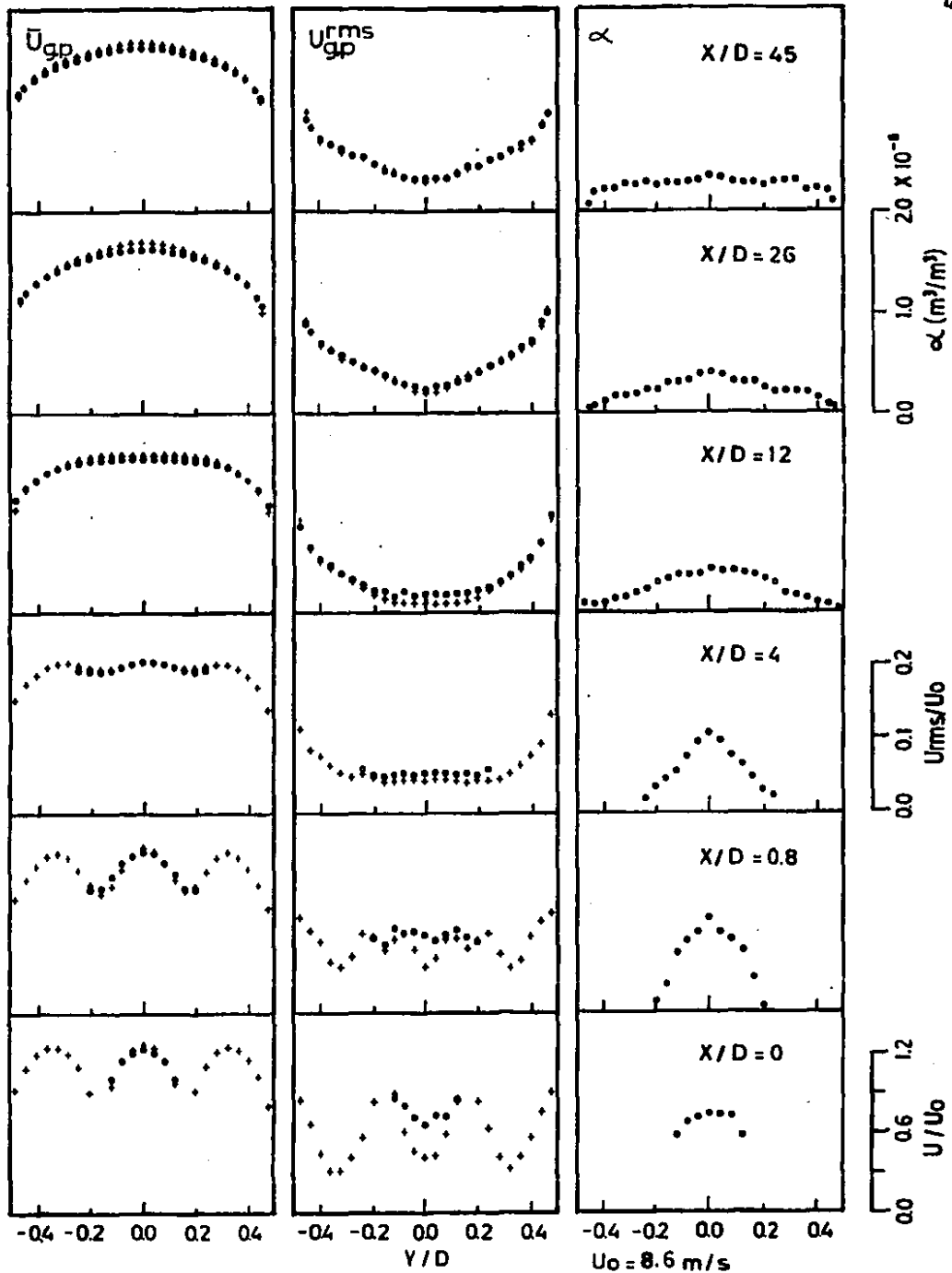


Figura 4.6. Resultados experimentales del flujo con partículas en suspensión. Caso de estudio 1.

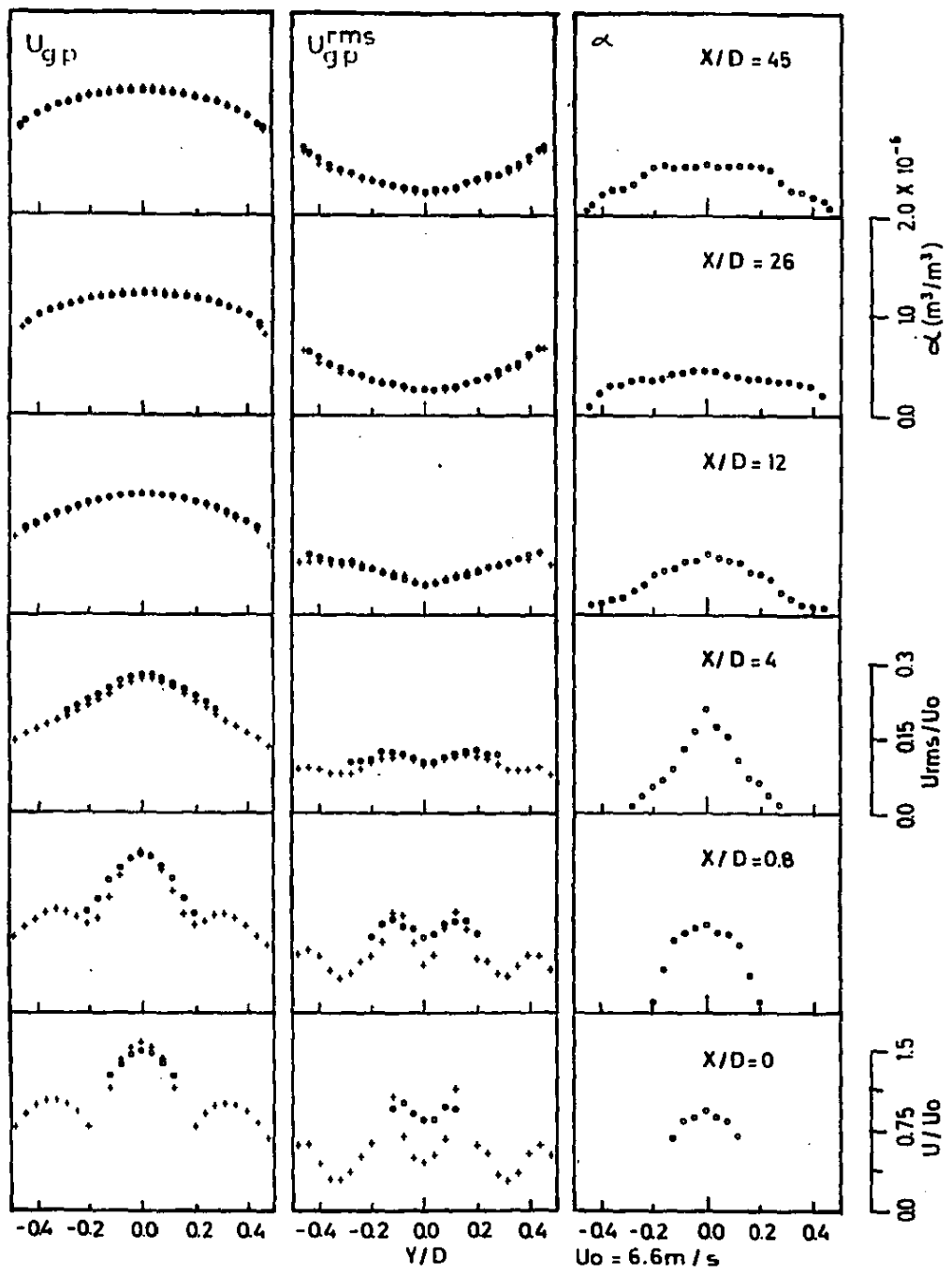


Figura 4.7. Resultados experimentales del flujo con partículas en suspensión. Caso de estudio 2.

Milojevic et al. (1986)), se deben a que éstas poseen una inercia mayor al penetrar a la subcapa viscosa y se ven afectadas en menor grado por las fuerzas viscosas, en comparación con las partículas más pequeñas.

En los perfiles de velocidad media correspondientes al caso de estudio 2 (Fig. 4.7), medidos en las secciones $X/D = 4$ y $X/D = 12$, se observa claramente que las partículas alcanzan velocidades superiores a las del aire. Este fenómeno se presenta con mayor claridad en los resultados de Milojevic et al. (1986), en el mismo caso de estudio y en los perfiles correspondientes exactamente a las mismas secciones de medición (Fig. 4.10). En el caso 1, sin embargo, las velocidades del gas son superiores a las de las partículas en los mismos perfiles (ver Figs. 4.6 y 4.9). Este resultado tiene su explicación en lo siguiente: para el caso 2, el flujo de cantidad de movimiento del gas en los canales laterales es relativamente pequeño comparado con el de las partículas en el canal central. Esto provoca que la fase dispersa tenga en las secciones aguas abajo una velocidad promedio mayor que la del fluido. Sin embargo, en el caso 1, el incremento en el flujo de cantidad de movimiento del gas en los canales laterales, trae como consecuencia también un incremento de la velocidad promedio del aire aguas abajo, que resultó mayor que la de las partículas. Cabe mencionar que las distribuciones de probabilidad de las velocidades del gas presentadas en el capítulo anterior (Figs. 3.9 y 3.10), muestran que la velocidad media de las partículas es superior a la del gas. Esto se debe a que fueron obtenidas en el punto $X/D = 12$, $Y/D = 0$, $Z = 0$, y bajo las condiciones experimentales del caso de estudio 2.

En la Fig. 4.8 se grafica la velocidad de deslizamiento adimensional $(U_g - U_p)/U_0$ registrada sobre la línea central del canal, como función de la coordenada longitudinal X/D . Esta figura es indicativa de la interacción existente entre ambas fases en la longitud de desarrollo del flujo: en ambos casos de estudio se observa que las partículas son frenadas bruscamente por la fase continua en los primeros 100 mm de la sección de medición, es decir, de $X/D = 0$ a $X/D = 4$, y que pierden en este trayecto la inercia que habían alcanzado en el canal central hasta antes de entrar a la sección de medición. Esto se traduce en las velocidades de deslizamiento negativas obtenidas en $X/D = 4$. Una vez que las partículas han perdido gran parte de su inercia inicial, el comportamiento se invierte, siendo ahora el fluido el que acelera a las partículas, lo cual se refleja en el incremento hasta lograr un valor positivo de la velocidad relativa (desde $X/D = 4$ hasta $X/D = 12$). Finalmente, a partir de $X/D = 32$, siendo el flujo desarrollado, el valor de la velocidad relativa $(U_g - U_p)/U_0$ se estabiliza en un valor aproximado de 0.04 para el caso 1 y de 0.03 para el caso 2.

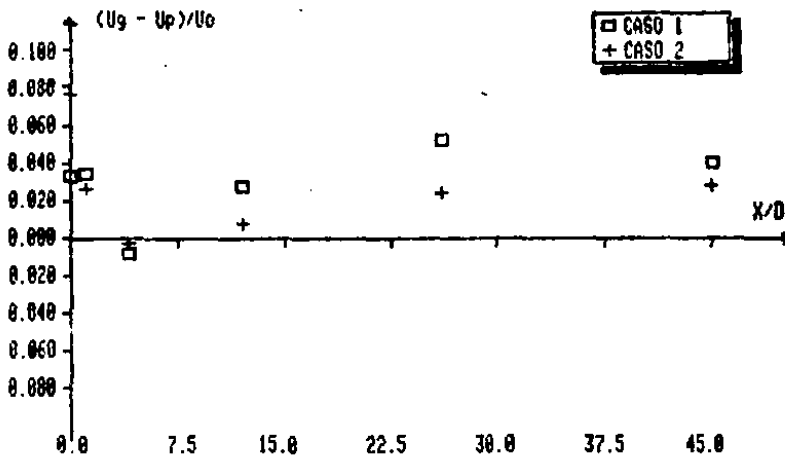


Figura 4.8. Velocidad de deslizamiento adimensional en la línea central del canal de medición.

Los resultados de los valores rms de las velocidades del gas muestran, para ambos casos de estudio, que la presencia de las partículas a tan bajas concentraciones no altera la intensidad de turbulencia del flujo de aire, es decir, que no se les puede considerar como productores ni como atenuadores de los niveles de turbulencia de la fase continua. Esto se comprueba comparando las formas de los respectivos perfiles de los valores rms de la velocidad del gas, nuevamente de las Figs. 4.2 y 4.6 (caso 1) y de las Figs. 4.3 y 4.7 (caso 2), y en los resultados graficados en la Fig. 4.5, en donde las diferencias de los valores obtenidos de los experimentos en una y dos fases respectivamente, no sobrepasan un 5%.

La intensidad de turbulencia de las partículas disminuye a lo largo de la sección de medición y es aproximadamente igual a la de la fase continua a la salida del canal. Esto se verifica en los perfiles de los valores rms de las velocidades de las partículas en ambos casos de estudio (Figs. 4.6 y 4.7). Esta observación tiene diversas implicaciones:

- a) El elevado nivel de turbulencia que alcanzan las partículas al ser dosificadas a la tobera inferior del subcanal central que desemboca a la sección de medición, no alcanza a relajarse en los 0.8 m de longitud del mismo y esto provoca que las partículas lleguen a la entrada de la sección con una intensidad de turbulencia mayor que la del aire.
- b) No obstante que la mezcla de los tres chorros en los primeros milímetros de la sección de medición ($X/D = 8$) produce un incremento sensible de la intensidad de turbulencia del aire, ésta no alcanza al nivel que poseen todavía las partículas.
- c) Las partículas tienden a perder su intensidad de turbulencia al encontrarse rodeadas por un flujo cuya intensidad es menor.
- d) Las partículas de 50×10^{-6} m de diámetro son lo suficientemente pequeñas para responder rápidamente a los remolinos turbulentos y tener por consecuencia niveles de intensidad de turbulencia muy similares a los del flujo que las rodea, es decir, que responden en mayor grado a las fuerzas viscosas que a las inerciales. Esto explica que las partículas adquieran valores muy similares a los del aire a la salida del canal.

Los resultados de Milojevic et al. (1986) para partículas de 110×10^{-6} m de diámetro, graficados en las Figs. 4.9 y 4.10 muestran, sin embargo, un comportamiento completamente diferente: la intensidad de turbulencia de las partículas en $X/D = 0$ es menor que la del flujo de aire; posteriormente, durante el desarrollo del flujo, se incrementa para alcanzar valores muy superiores a los de la fase continua (desde $X/D = 4$ hasta $X/D = 22$); y finalmente decrece a valores cercanos a los del aire a la salida del canal (en $X/D = 42$). Además, las formas de los perfiles obtenidos son muy diferentes comparados con las de este estudio y con las del caso monofásico. Este comportamiento puede tener dos explicaciones:

- a) Al tener las partículas un mayor diámetro y responder en menor grado a las fuerzas viscosas, la dosificación de las mismas al subcanal central incrementa su intensidad de turbulencia en mucho menor grado, y esto se traduce en una menor intensidad de turbulencia a la entrada de la sección de medición. Posteriormente, el incremento del nivel de turbulencia como consecuencia de la mezcla de los tres chorros en $X/D = 0.8$, y el primer choque de las partículas con la pared en $X/D = 4$ (notar que en esta sección, la concentración en la pared ya no es nula), provocan un incremento fuerte de la intensidad de turbulencia de las partículas que se refleja en los resultados desde $X/D = 4$ hasta $X/D = 22$. Por último, la intensidad de turbulencia disminuye para adquirir valores cercanos a los de la fase continua que la transporta.
- b) Cabe la posibilidad de una fuerte mezcla de la información correspondiente a cada fase que pone en duda la validez de estos resultados, ya que los experimentos de Milojevic et al. (1986) se realizaron utilizando sólo el criterio de discriminación por amplitud. (Recordar que, de acuerdo con lo discutido en el capítulo anterior, este tipo de discriminación presenta sus mayores deficiencias en los momentos de orden superior de las distribuciones de probabilidad de la velocidad, es decir, que influye directamente en los resultados de los valores rms).

Los perfiles de la fracción volumétrica presentados en las Figs. 4.6 y 4.7, muestran la dispersión de las partículas desde el centro hasta ocupar la totalidad de la sección transversal del canal durante el desarrollo del flujo.

Los perfiles obtenidos de ambos casos de estudio son muy similares y muestran que la dispersión alcanza la totalidad del canal hasta $X/D = 12$. Comparando este resultado con el de las partículas de 110×10^{-6} m de diámetro (Figs. 4.9 y

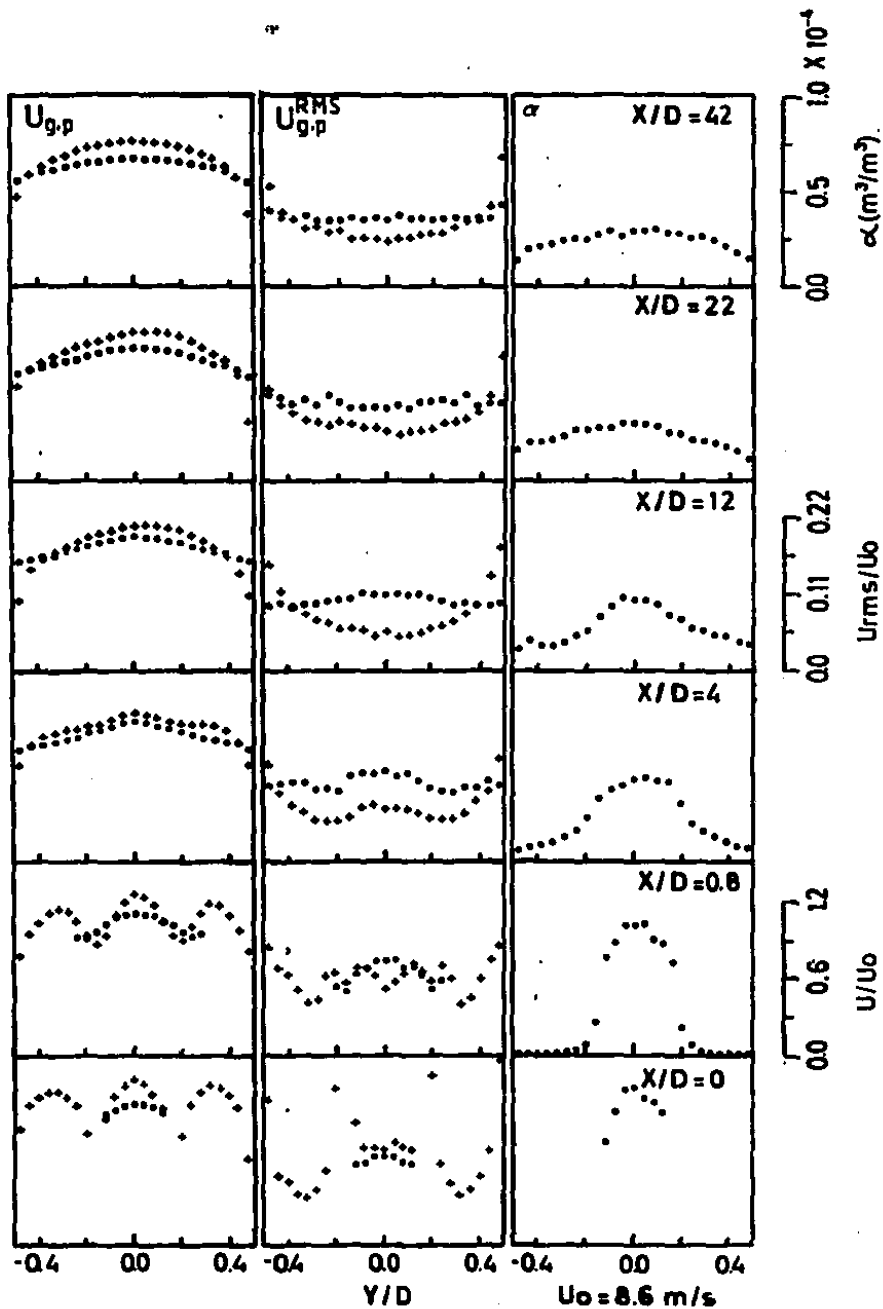


Figura 4.9. Resultados obtenidos por Milojevic et al. (1986), para un flujo con partículas en suspensión de 110 μ m de diámetro medio. Caso de estudio 1.

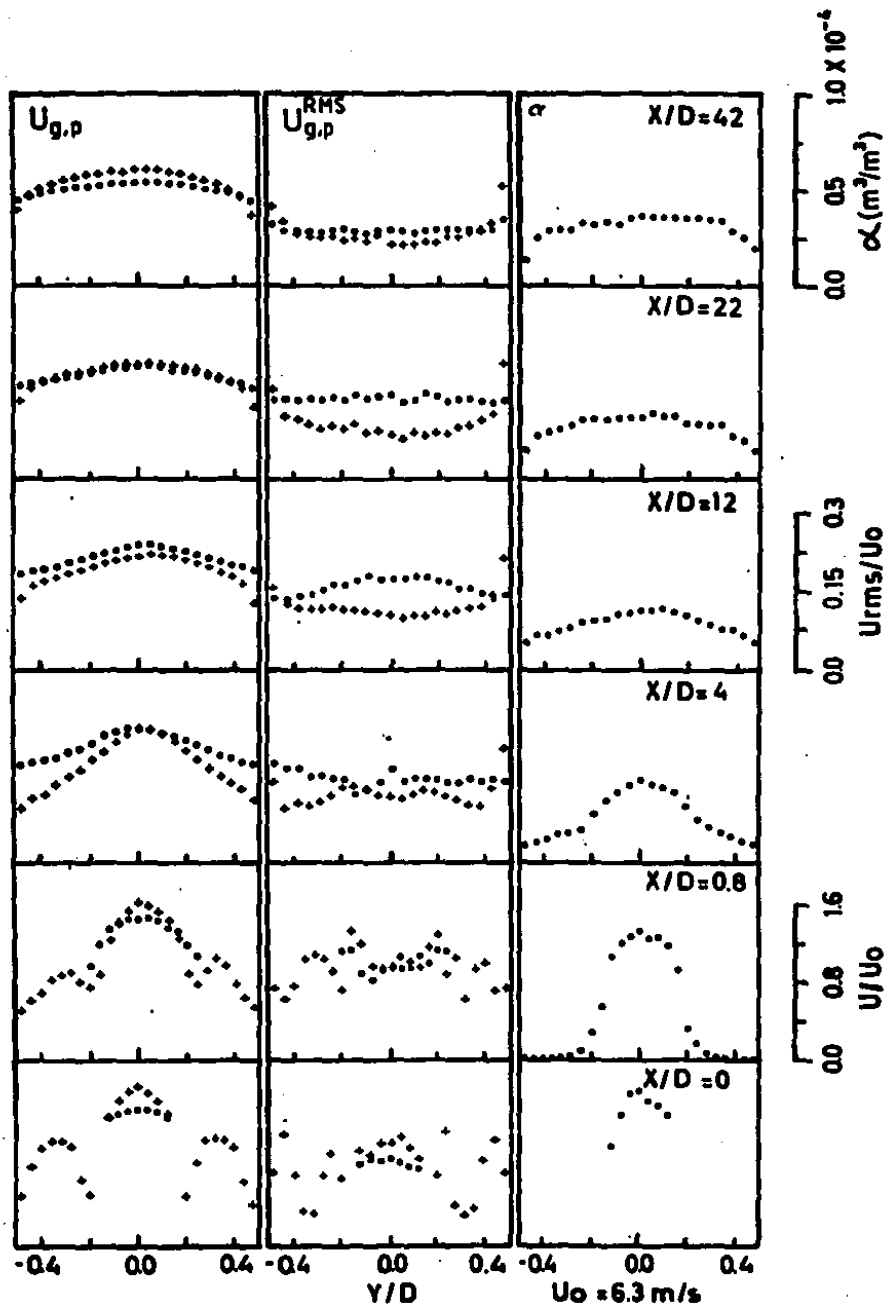


Figura 4.10. Resultados obtenidos por Milojevic et al. (1986), para un flujo con partículas en suspensión de 110 μ m de diámetro medio. Caso de estudio 2.

4.10), se demuestra que la dispersión es más rápida en este último caso, ya que las partículas ocupan la totalidad del canal desde $X/D = 4$. Este fenómeno indica que la dispersión de las partículas de 110×10^{-6} m se debe principalmente a su inercia inicial en dirección transversal y no a un proceso de difusión turbulenta, como el que tiene lugar en las partículas de menor tamaño.

En los puntos de medición más cercanos a las paredes se midieron concentraciones muy bajas, que sugieren la existencia de una zona libre de partículas en la subcapa viscosa, la cual podría atribuirse a la fuerza de flotación inducida por los esfuerzos cortantes, que fue deducida por primera vez por Saffman (1965).

4.3 Mediciones de presión

Los resultados de la Fig. 4.11 presentan las diferencias de presión obtenidas en la pared del canal en $X/D = 0.8, 8.8, 18.8, 28.8, 38.8$ y 50.0 , con respecto a la presión P_0 medida en $X/D = -3.2$.

Los resultados indican que la caída de presión es aproximadamente lineal en ambos casos de prueba. Además, las diferencias observadas entre los valores obtenidos de los flujos monofásico y bifásico respectivos a ambos casos de estudio son tan pequeñas, que se demuestra una vez más que la presencia de las partículas a tan bajas concentraciones no afecta de manera significativa las características del flujo de aire.

Los valores de $P - P_0$ obtenidos en $X/D = 0.8$ para el caso 1, y en $X/D = 0.8$ y 8.8 son positivos e indican que el proceso de mezcla de los tres chorros provoca también un incremento de presión en el canal y que este es mayor en el caso 2, debido a los mayores gradientes de velocidad de los chorros.

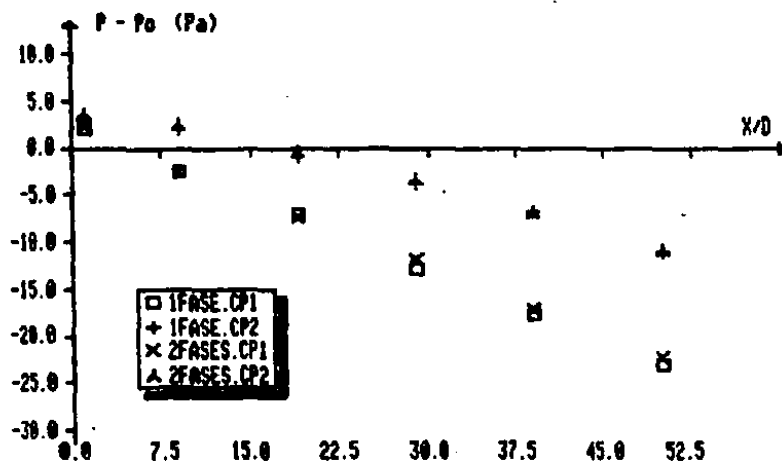


Figura 4.11. Caída de presión medida en la pared de la sección de medición.
 P_o = Presión en $X/D = -3.2$.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

5.1. Técnica experimental.

La aplicación del velocímetro láser-Doppler para la medición de flujos bifásicos presenta una serie de dificultades que se han ido resolviendo gradualmente en el transcurso de las dos últimas décadas. El problema fundamental consiste en identificar las señales que provienen de los trazadores que determinan la velocidad de la fase continua del flujo, de aquellas que provienen de la fase dispersa. Durst & Zaré (1975) desarrollaron la teoría que ha sido la base de publicaciones posteriores (como por ejemplo la de Saffman et al. (1984)) que han conducido a técnicas que no sólo permiten la discriminación correcta de la información respectiva a cada fase, sino que determinan con toda precisión la velocidad y el tamaño de una partícula cuando cruza el volumen de control. Su principio es la proporcionalidad existente entre el defasamiento de dos señales provenientes de dos fotodetectores colocados a un cierto ángulo con respecto al eje óptico del velocímetro. Su implementación es, sin embargo, sumamente costosa.

Por medio del procesamiento digital de señales y de las características fundamentales de las señales Doppler, amplitud y visibilidad, es posible medir flujos con partículas en suspensión de una manera más económica. Las condiciones para llevar a cabo la discriminación correcta de la información de cada fase involucran una distribución de tamaños conocida de antemano con dos diámetros predominantes, una baja concentración (se han llevado a cabo mediciones exitosas en flujos de aire con partículas de sílice a fracciones volumétricas hasta de $7.25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ y posiblemente éste no sea el valor máximo), una clara dependencia de la amplitud y visibilidad del diámetro de la partícula. Para esto último, es fundamental conocer el fenómeno de dispersión de la luz provocado por una partícula al encontrarse en el punto de intersección de dos haces luminosos (Durst & Zaré (1975)).

La amplitud de la señal Doppler depende en primer lugar del tamaño de la partícula que cruza el volumen de control, siendo las partículas más grandes las que normalmente poseen la amplitud mayor. Esto se debe a que las partículas que ocupan un mayor espacio dentro del volumen de control, o bien, la totalidad de éste, dispersan por consecuencia una

cantidad de luz mayor. Sin embargo, la amplitud de la señal también depende de otros parámetros, algunos de ellos muy difíciles de controlar. Entre ellos podemos mencionar la potencia del láser empleado, el tamaño de la apertura de la lente receptora, el factor de amplificación del fotomultiplicador, el tipo de arreglo utilizado (dispersión hacia adelante o hacia atrás), la trayectoria que siguen las partículas a través del volumen de control, las propiedades ópticas de las partículas y del medio que las rodea, la suciedad de las ventanas del canal o de las lentes, la correcta alineación y enfoque del velocímetro, etc.

La visibilidad de las señales de partículas cuyo tamaño es menor a la distancia de separación entre las franjas que conforman el volumen de control, es normalmente unitaria. Este es el caso de los trazadores que detectan la velocidad de la fase continua. Sin embargo, cuando se trata de partículas de mayor diámetro, la relación entre su tamaño con la visibilidad no es inmediata, ya que el fenómeno óptico involucrado es sumamente complejo. Tomando como punto de partida la teoría de Durst & Zaré (1975), la señal Doppler es el resultado de la cantidad de luz que integra el fotomultiplicador al pasar una partícula de gran tamaño por el volumen de control y formar su patrón de interferencia móvil en el espacio. En particular, el número de franjas de este patrón que pasan a cada instante a través de la lente receptora y, consecuentemente, la distancia de separación entre ellas, juegan un papel definitivo en el valor de la visibilidad. Esta distancia depende del diámetro de la partícula, de la distancia de ésta al plano de la apertura de la lente receptora, del ángulo del eje óptico del fotomultiplicador con respecto al de los rayos incidentes, de la longitud de onda de la fuente luminosa, y de los índices de refracción de la partícula y del medio que la rodea. Estos parámetros y el tamaño de la apertura de la lente receptora serán entonces, los que tendrán influencia directa sobre la visibilidad de la señal Doppler.

La discriminación de las fases se puede llevar a cabo por medio de la selección de un valor de amplitud, de tal forma que las señales que lo sobrepasen provengan de las partículas de la fase dispersa, y en el caso contrario, de los trazadores. La selección del nivel de discriminación se puede efectuar mediante las distribuciones de probabilidad para la amplitud, escogiendo el punto de menor frecuencia que se sitúa entre los dos máximos de la curva correspondientes a los dos diámetros predominantes. Por su parte, la discriminación por visibilidad se puede llevar a cabo con la condición de que los parámetros ópticos mencionados en el párrafo anterior, sean ajustados de tal forma que se integre un número de franjas suficiente para garantizar la obtención de señales con visibilidad cercana

a cero, en el caso de las partículas de la fase dispersa. Entonces, las señales provenientes de los trazadores deberán tener una visibilidad mayor que el nivel de discriminación seleccionado y viceversa. La selección del nivel de discriminación es análoga al caso de la amplitud. Estos dos criterios se pueden también aplicar simultáneamente para asegurar una mejor separación.

Los resultados experimentales del capítulo 3 demuestran que la discriminación de las fases basada solamente en la amplitud de la señal Doppler es insuficiente y conlleva errores significativos en los valores rms de las fluctuaciones de la velocidad, en particular en los correspondientes a la fase continua. Estos errores son aún mayores, cuando no se selecciona correctamente el nivel de discriminación. En cuanto a la discriminación por visibilidad, se puede afirmar que es un método capaz de obtener resultados confiables, siempre que los parámetros ópticos del sistema y el nivel de discriminación sean ajustados adecuadamente. Nuevamente la mala selección del nivel de discriminación provoca los máximos errores en los resultados de los valores rms de las fluctuaciones de la velocidad del gas.

El método de discriminación por amplitud y visibilidad simultáneos es lógicamente el método más confiable, ya que no acepta señales de procedencia dudosa (p. ej. señales con gran amplitud y visibilidad unitaria, o viceversa). Su aplicación requiere obviamente la selección correcta de los niveles de discriminación y de los parámetros ópticos del sistema. Los máximos errores se observan una vez más sobre los valores rms de la velocidad del gas, y se cometen al seleccionar erróneamente el nivel de discriminación por amplitud. La doble discriminación disminuyó los errores provocados por la selección inadecuada del nivel de discriminación por visibilidad.

5.2. Resultados Experimentales.

5.2.1. Mediciones en una fase.

Para caracterizar el campo de flujo se consideró conveniente realizar dos series experimentales en una fase, bajo las mismas condiciones de velocidad a la entrada del canal que para los experimentos en dos fases. De esta forma fue posible entender el tipo de flujo al que se deberían someter las partículas y el efecto que éstas tendrían sobre la fase continua.

A la entrada del canal, en $X/D = 0$, se tienen en ambos casos de estudio tres chorros independientes que presentan cualitativamente las características de flujos turbulentos desarrollados y sus perfiles son similares a los obtenidos por Laufer (1954) en un flujo ascendente de aire dentro de un tubo vertical.

En los primeros milímetros de desarrollo del flujo, desde $X/D = 0$ hasta $X/D = 0.8$, los tres chorros sufren un intenso mezclado, que se traduce en un sensible incremento de la intensidad de turbulencia y de la presión sobre la pared del canal. Este proceso de mezcla resultó ser más intenso en el caso de estudio 2, en virtud de los mayores gradientes de velocidad existentes.

La longitud comprendida entre $X/D = 0.8$ y $X/D = 12$ se caracteriza por un relajamiento de la actividad turbulenta, que se refleja en la disminución de los valores rms de la velocidad y también en una reducción de la presión sobre la pared del canal. Este relajamiento es más pronunciado en el caso de estudio 1.

El desarrollo del flujo concluye entre las secciones $X/D = 12$ y $X/D = 32$. En esta región, el comportamiento es diferente para cada caso de estudio y se describe a continuación:

En el caso 1, se incrementa gradualmente la intensidad de turbulencia desde su valor mínimo en $X/D = 12$ hasta alcanzar un valor aproximadamente constante en $X/D = 32$. Los perfiles de velocidad media no presentan diferencias significativas.

En el caso 2, la intensidad de turbulencia continúa una disminución gradual hasta alcanzar su nivel constante, también a partir de $X/D = 32$, y los perfiles de velocidad media presentan diferencias significativas en cuanto a su forma. Lo anterior se debe a que el mezclado más intenso que sufre el flujo en los primeros milímetros del canal, tarda más tiempo en relajarse y abarca la totalidad de la longitud de desarrollo.

A partir de $X/D = 32$, los flujos son desarrollados y los perfiles obtenidos son una vez más muy similares a los resultados de Laufer (1954).

Las mediciones en los puntos más cercanos a las paredes del canal registraron las velocidades medias mínimas e indican la condición de no deslizamiento en la pared. La existencia de la subcapa viscosa se traduce en una reducción brusca del nivel de turbulencia del flujo en la región adyacente a la pared. De acuerdo con los resultados de Laufer (1954), el espesor de esta capa es mayor para números de Reynolds menores. En los resultados experimentales obtenidos, se

confirmó lo anterior, siendo el espesor observable de la subcapa viscosa mayor en el caso de estudio 2, que corresponde a un número de Reynolds menor.

5.2.2. Mediciones en dos fases.

Las partículas suministradas al canal central son transportadas por el flujo de aire hasta llegar a la entrada de la sección de medición, donde su velocidad media sobre la línea central es ligeramente menor, pero su intensidad de turbulencia es mucho mayor que la del aire. Esto último se debe a que el elevado nivel de turbulencia que alcanzan las partículas al ser dosificadas a la tobera inferior del subcanal central, no alcanza a relajarse en sus 0.8 m de longitud.

En los primeros milímetros de desarrollo, desde $X/D = 0.8$ hasta $X/D = 4$, las partículas son frenadas bruscamente por la fase continua y, en el caso de estudio 2, alcanzan inclusive velocidades medias que son mayores que las del aire y que se observan en $X/D = 4$ y $X/D = 12$. Esto se corrobora también a través de la fuerte reducción obtenida en la velocidad de deslizamiento, que alcanza valores negativos en $X/D = 4$. Lo anterior se debe a que el flujo de cantidad de movimiento del gas en los canales laterales es menor para el caso de estudio 2, y esto trae como consecuencia una velocidad promedio también menor aguas abajo, que resulta inferior que la de las partículas. Por otra parte, en lo que respecta a los niveles de turbulencia, se observa que a pesar de que el aire incrementa sensiblemente su intensidad de turbulencia en virtud de la mezcla de los tres chorros, ésta no alcanza los niveles que todavía poseen las partículas debido a su condición inicial.

Mientras que el flujo de aire continúa su desarrollo prácticamente inalterado por la presencia de las partículas a tan bajas concentraciones, éstas pierden velocidad e intensidad de turbulencia hasta que abarcan la totalidad del canal en $X/D = 12$. A partir de esta sección, es la fase continua nuevamente la que impulsa a las partículas y la que les comunica sus movimientos turbulentos. Es por esto que en $X/D = 26$, las partículas poseen una velocidad media ligeramente menor que la del aire y una intensidad de turbulencia similar.

Cuando las partículas viajan desde el centro y se aproximan a la pared del canal, se encuentran con que la velocidad del fluido que las rodea es cada vez menor, pero su turbulencia mayor. Su inercia provoca penetren a la subcapa viscosa con una velocidad e intensidad de turbulencia superiores a las del aire. Dentro de esta capa, las partículas experimentan

una fuerza de repulsión provocada por los esfuerzos viscosos (Saffman (1965)) que tiende a alejarlas de la pared. Un pequeño número alcanzarán a rebotar contra ella, pero la mayoría regresarán a la región de turbulencia desarrollada. Este fenómeno trae como consecuencia que las concentraciones en los puntos más cercanos a la pared sean tan bajas sobre todo en el caso 2, donde la subcapa viscosa tiene un espesor mayor.

La comparación de los resultados de este estudio con los de Milojevic et al. (1986) para partículas de 110×10^{-6} m de diámetro medio complementa la descripción de los párrafos anteriores.

Las partículas de mayor diámetro llegan a la entrada de la sección de medición con una intensidad de turbulencia sensiblemente menor que la del gas. En la longitud de desarrollo, estas partículas parecen responder a los movimientos turbulentos del flujo hasta superar su nivel de turbulencia a partir de $X/D = 4$. Por otro lado, se dispersan más rápido para ocupar la totalidad de la sección a partir $X/D = 4$. Su inercia es tan grande, que en el caso de estudio 2 su velocidad media es muy superior a la del aire en $X/D = 4$ y en $X/D = 12$, y penetran a la subcapa viscosa sin disminuir casi su velocidad hasta impactarse y rebotar contra la pared. Esto se traduce en valores altos de concentración en los puntos más cercanos a las paredes.

5.3. Futuras investigaciones.

El presente estudio presenta una técnica experimental que podrá utilizarse en investigaciones subsecuentes a la presente. Además, los resultados experimentales obtenidos tanto de los flujos en una como en dos fases son confiables, han servido y seguirán siendo útiles para desarrollar modelos que describen la parte dinámica del flujo.

Como continuación inmediata se contempla la medición de transferencia de calor en flujos similares y como parte final, la transferencia de masa.

Lo anterior cumpliría en su totalidad los objetivos del proyecto del que forma parte esta tesis.

REFERENCIAS

- Arnason, G., 1982. Measurement of particle dispersion in turbulent pipe flow. Tesis Doctoral, Universidad Estatal de Washington, Fullman.
- Bock, R. & Boerner, T., 1984. Charakterisierung von vertikalen Partikel/Gasstromungen mit Hilfe der Laser-Doppler Anemometrie. Reporte del LSTM 64/E/84, Universidad de Erlangen, RFA.
- Boerner, T., Durst, F. & Manero, E., 1986. LDV-measurements of gas-particle confined jet flow and digital data processing. 3er. Simposio Internacional sobre Aplicaciones de la Anemometria Laser Doppler a la Mecánica de Fluidos, artículo 4.5, Lisboa, Portugal.
- Boerner, T., Durst, F. & Manero, E., 1987. Computation and experimental measurements of the flow in a plane confined jet. 2da. Conferencia Internacional sobre Avances y Aplicaciones de la Anemometria Láser Doppler, artículo 23, pp. 355 - 368, Universidad de Strathclyde, Escocia, Reino Unido.
- DIN 1952, 1948. VDI-Durchflussmessregeln, Regeln fuer die Durchflussmessung in genormten Duessen, Blenden und Venturiduesen. Verlag Deutscher Ingenieure, Dusseldorf.
- Drain, L. E., 1985. Laser anemometry and particle sizing. Conferencia Internacional sobre Avances y Aplicaciones de la Anemometria Laser Doppler. Manchester, Reino Unido.
- Durst, F. & Zaré, M., 1975. Laser-Doppler measurements in two-phase flows. Proc. de Simposio de Anemometria Laser Doppler, Universidad de Dinamarca.
- Durst, F., Melling, A. & Whitelaw, J.H., 1981. Principles and practice of laser-Doppler anemometry. Academic Press, 2a. edición.
- Durst, F., 1982. Review-combined measurements of particle velocities, size distributions, and concentrations. J. of Fluids Eng., Vol. 104, pp.284-296.
- Durst, F. & Boerner, T., mayo 23 y 24, 1985. Reporte de la Segunda Conferencia Internacional sobre Modelado de Flujos Bifásicos. Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad de Erlangen, R.F.A.

- Durst, F., Boerner, T. & Milojevic, D., junio 25 a 27, 1986. Reporte de la Tercera Conferencia Internacional sobre Modelado de Flujos Bifásicos. Instituto Boris Kidric para Investigaciones en Ingeniería Térmica y Energía, Belgrado, Yugoslavia.
- Durst, F. & Ruck, B., 1986. Effective particle size range in laser-Doppler anemometry. Exp. in Fluids, aceptado para publicación.
- Durst, F. & Boerner, T., octubre 21 a 23, 1987. Reporte de la Cuarta Conferencia Internacional sobre Modelado de Flujos Bifásicos. Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad de Erlangen, R.F.A.
- Elgobashi, S., Abou-Arab, F., Rizk, M., & Mostafa, A., 1984. Prediction of the particle laden jet with a two-equation turbulence model. Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 10, No. 6, p. 697.
- Farmer, W. M., 1972. Measurement of particle size, number density and velocity using a laser interferometer. Journal of Applied Optics, Vol. 11, pp. 2603-2609.
- Hildebrand, F. B., 1982. Introduction to numerical analysis. Mc Graw Hill.
- Hishida, K., Tajima, K. & Maeda, M., 1984. Measurement of two-phase turbulent flow by LDA with particle size discrimination, Laser Anemometry in fluid Mechanics. Ladoan-Instituto Superior Tecnico, 1096 Lisboa Codex Portugal.
- Krambrock, W., 1971. Die Berechnung des Zyclonabscheiders und praktische Gesichtspunkte zur Auslegung. Z. fuer Aufbereitung und Verfahrenstechnik, 7, pp. 391-401.
- Laufer, J., 1954. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. National Advisory Committee for Aeronautics, reporte 1174.
- Lee, S.L. & Durst, F., 1982. On the motion of particles in turbulent duct flows. Int. J. Multiphase flow, Vol. 8 No. 2, pp. 125-146.
- Manero, E. & Cervantes J.G., 1987. Aplicación del anemómetro láser-Doppler al estudio de flujos bifásicos con partículas en suspensión. Memorias del 13o. Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, pp. 129-136, Guadalajara, México.
- Manero, E., Boerner, Th., & Durst, F., 1986. Particle Dispersion in a confined jet flow. Reporte de LSTM 153/E/86, Universidad de Erlangen, RFA.

Milojevic, D., Boerner, Th. & Durst, F., 1986. LDA-measurements of dispersed gas-particle flow in a plane, two-dimensional confined jet. (Por ser publicado).

Milojevic, D., Boerner, Th. & Durst, F., 1986. Prediction of turbulent gas-particle flows measured in a plain confined jet. Proc. de la Conferencia Internacional sobre Tecnologia de Particulas, Nurenberg, RFA.

Milojevic, D., 1986. Confined jet two-phase flow. Tesis doctoral. Universidad de Belgrado, Yugoslavia.

Modarres, D., Tan, H. & Elgobashi, S., 1984. Two-component LDA-measurement in a two-phase turbulent jet. AIAA Journal, Vol. 22, No. 5.

Saffmann, H., Buchave, P. & Tanger, H., 1984. Simultaneous measurement of size, velocity and concentration of spherical particles by a laser-Doppler method. Proc. del 2o. Simposio Internacional sobre las Aplicaciones de la Anemometria Laser Doppler a la Mecánica de Fluidos.

Saffmann, P.Q., 1965. The lift on a small sphere in a slow shear flow. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 22, p. 385.

Snyder, W.H. & Lumley, J.L., 1971. Some measurements of particle velocity autocorrelation functions in a turbulent flow. J. Fluid Mech., Vol. 48, part 1, pp.41-71.

Tsuji, Y., Morikawa, Y. & Shiomi, H., 1984. LDA-measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe. J. Fluid Mech., Vol. 139, pp. 417-434.

Ungut, A., Yule, A.J., Taylor, D.S. & Chigier, N.A., 1978. Simultaneous velocity and particle size measurements in two phase flows by laser anemometry. AIAA paper 78-74.

Wells, M.R. & Stock, D.E., 1983. The effects of crossing trajectories on the dispersion of particles in a turbulent flow. J. Fluid Mech., Vol. 136, pp. 31-62.

APENDICE I**EL VELOCIMETRO LASER DOPPLER**

La anemometría láser-Doppler (ALD), es un método óptico para la medición de velocidades de fluidos que permitan el paso de la luz. Sus ventajas principales se enuncian a continuación:

Es un método no intrusivo, es decir, que no requiere de ningún tipo de sonda que además de alterar el flujo, conlleva una difícil interpretación de los resultados.

Permite mediciones en flujos en donde ningún método mecánico o térmico puede ser utilizado. Por ejemplo, en flujos bifásicos, en flamas, en flujos supersónicos, en flujos de líquidos a grandes velocidades, en motores de combustión o en turbomáquinas, en propelas, o en flujos cercanos al número de Reynolds crítico o altamente turbulentos, etc.

La relación de la "frecuencia Doppler" y la velocidad del flujo es una sencilla función algebraica que es independiente de las propiedades del fluido de que se trate.

No requiere calibración.

Es sensible a la magnitud y a la dirección de la velocidad.

Mide un solo componente de la velocidad.

Alta precisión.

Sus desventajas principales son:

Requiere de partículas (trazadores) en el flujo. Esto constituye un peligro para la salud del experimentador, así como causa problemas de carácter técnico, ya que se tiene que asegurar que las velocidades de las partículas y del fluido sean iguales, lo cual puede ser difícil en el caso de flujos altamente turbulentos.

El fluido debe ser transparente.

Es un método relativamente caro.

1. El efecto Doppler y su aplicación a la anemometría láser-Doppler.

El principio utilizado por la ALD es el cambio de frecuencia experimentado por la luz reflejada por una partícula en movimiento (efecto Doppler).

1.1. Receptor en movimiento (partícula).

En acuerdo con la Fig. 1.1, la frecuencia de la luz observada ν_p por un receptor que se mueve con una velocidad \bar{U} , proveniente de una fuente de luz estacionaria que emite con una frecuencia ν_o y longitud de onda λ_o , se puede expresar como:

$$\nu_p = \nu_o (1 - \bar{U} \cdot \bar{l} / c) \quad (1.1)$$

1.2. Transmisor en movimiento (partícula)

Respectivamente, para el caso de una fuente luminosa que se mueve con una velocidad \bar{U} , se tiene que la frecuencia detectada por un observador estacionario A, (obsérvese la Fig. 1.2), es:

$$\nu_a = \nu_p (1 / (1 - \bar{U} \cdot \bar{l} / c)) \quad (1.2)$$

Las expresiones 1.1 y 1.2 se pueden combinar para describir el arreglo mostrado en la Fig. 1.3, en donde la frecuencia registrada por el fotodetector tiene la siguiente forma:

$$\nu_d = \nu_o \frac{(1 - \bar{U} \cdot \bar{l} / c)}{(1 - \bar{U} \cdot \bar{K} / c)} \quad (1.3)$$

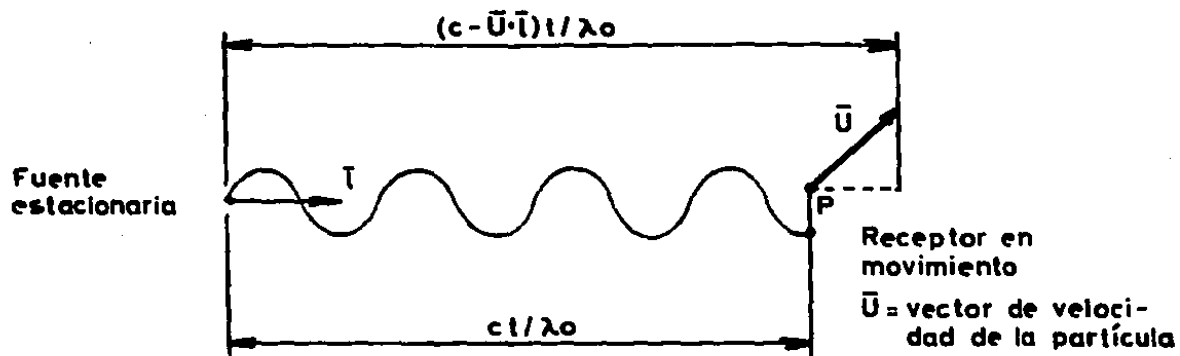


Figura 1.1. Efecto Doppler: Receptor en movimiento.

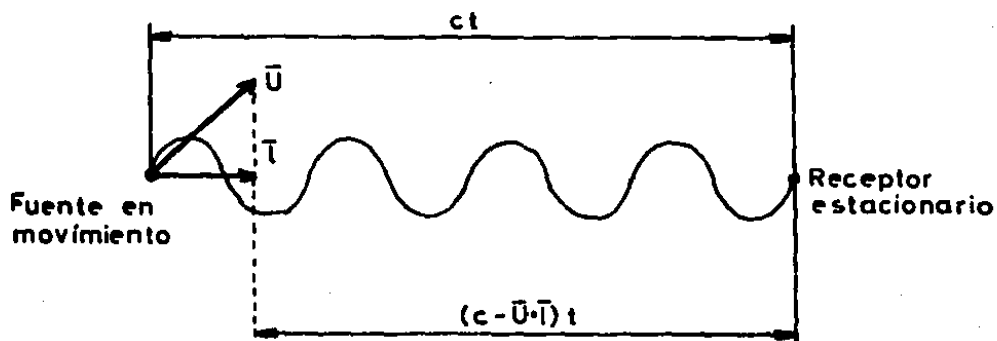


Figura 1.2. Efecto Doppler: Transmisor en movimiento.

La detección directa de esta frecuencia Doppler es imposible, como se puede observar en el ejemplo de la Fig. 1.4.

Una solución para la aplicación del efecto Doppler es el anemómetro láser dual, cuyo arreglo se muestra en la Fig. 1.5, y que es el tipo de velocímetro utilizado en esta investigación.

Las frecuencias detectadas por el fotomultiplicador, debidas a los rayos 1 y 2 son, respectivamente:

$$v_{d1} = v_o \frac{(c - \bar{U} \cdot \bar{I}_1)}{(c - \bar{U} \cdot \bar{K})} \quad (1.4)$$

$$v_{d2} = v_o \frac{(c - \bar{U} \cdot \bar{I}_2)}{(c - \bar{U} \cdot \bar{K})} \quad (1.5)$$

La diferencia entre las dos frecuencias está dada por:

$$\Delta v = v_{d1} - v_{d2} = v_o \frac{(1 - \bar{U} \cdot \bar{I}_1 / c) - (1 - \bar{U} \cdot \bar{I}_2 / c)}{(1 - \bar{U} \cdot \bar{K} / c)} \quad (1.6)$$

para $\bar{U} / c \ll 1$ y $v_o = c / \lambda$:

$$\Delta v = \frac{1}{\lambda} \bar{U} (\bar{I}_2 - \bar{I}_1) \quad (1.7)$$

o bien,

$$\Delta v = \frac{2}{\lambda} \text{sen } \phi \bar{U} \quad (1.8)$$

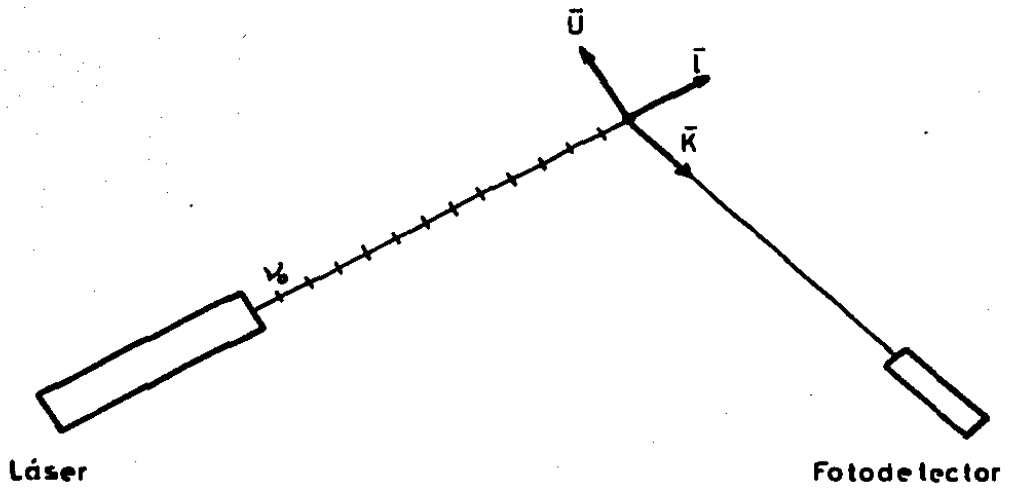
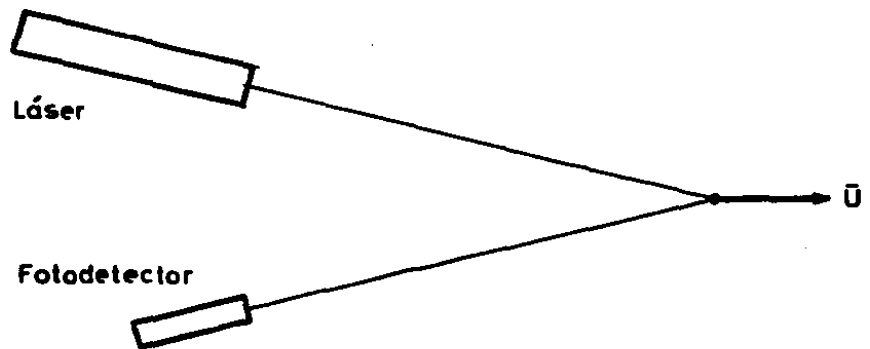


Figura I.3.



$$\nu_b = \nu_0 \frac{(1 - U/c)}{(1 + U/c)}$$

$$\nu_b = \nu_0 \frac{(1 - \epsilon)}{(1 + \epsilon)}$$

$$\nu_b = \nu_0 (1 - 2\epsilon + \dots)$$

Para: $U = 300 \text{ m/s}$ y $\nu_0 = 5 \times 10^{14}$

$$\nu_b = 5 \times 10^{14} - 10^7$$

La detección de esta frecuencia es imposible.

Figura I.4.

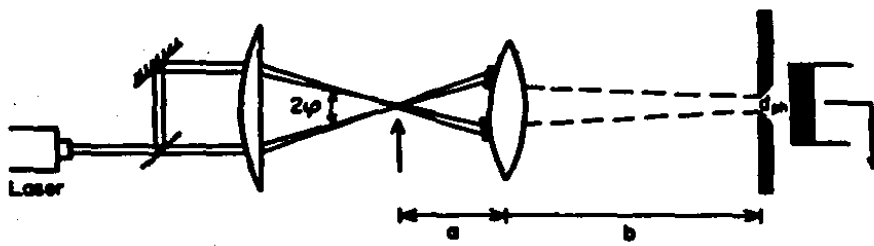


Figura 1.5. Velocímetro láser-Doppler dual.

2. El modelo de las franjas de Moire.

Las franjas de Moire pueden utilizarse para explicar las características básicas de la anemometría láser-Doppler. En este modelo se considera que en la región de interferencia de dos rayos láser coherentes y polarizados, (denominada como volumen de control), existen efectos constructivos y destructivos al cruzarse las dos ondas de luz. Esto forma planos de interferencia, cuya representación bidimensional resulta en franjas de diferente luminosidad. Estas franjas pueden en efecto observarse cuando un detector cuadrático se enfoca hacia el volumen de control. Lo anterior se ilustra en la figura 1.6.

De acuerdo con la Fig. 1.7, la distancia entre las franjas es:

$$\Delta X = \lambda / 2 \text{ sen } \phi \quad (1.9)$$

y la frecuencia que tendrá la señal detectada por el fotomultiplicador se puede expresar como:

$$v_d = \frac{2}{\lambda} U \text{ sen } \phi \quad (1.10)$$

Los resultados obtenidos en las ecs. 1.8 y 1.10 son idénticos.

Tal como señalan Durst, Melling & Whitelaw (1981), a pesar de la gran utilidad del modelo de las franjas de Moire en diversas situaciones que se presentan en la ALD, este modelo resulta incompleto para explicar los complejos fenómenos ópticos que tienen lugar al pasar una partícula a través del volumen de control.

Para fines prácticos, a continuación se presentan algunas relaciones geométricas que caracterizan al volumen de control, y que tienen relación con la Fig. 1.8.

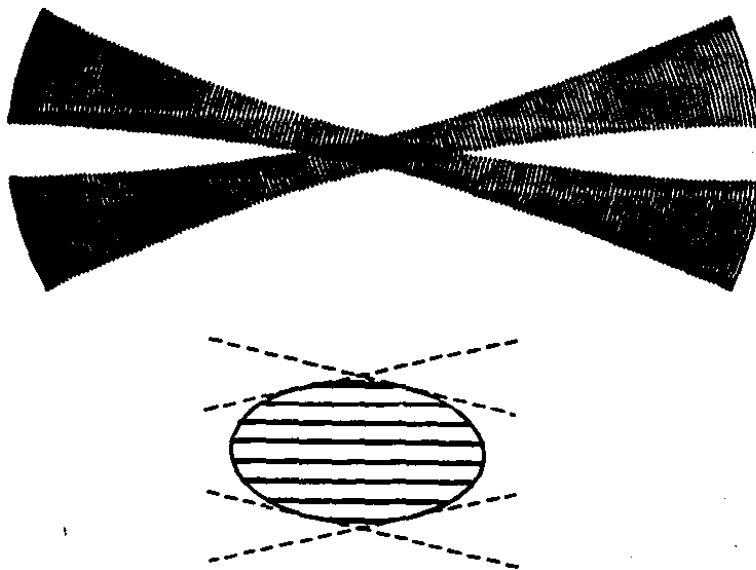


Figura I.6. Representación bidimensional de las franjas de Moiré en el volumen de intersección de dos rayos láser coherentes y polarizados.

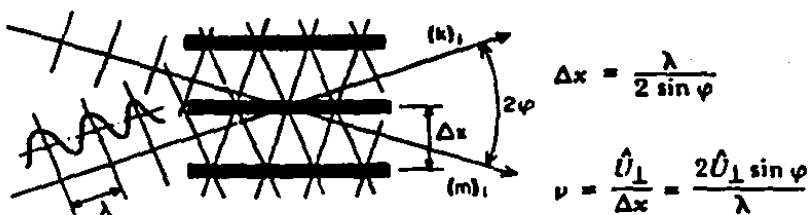


Figura I.7. Cálculo de la distancia de separación entre las franjas.

Diámetro del rayo láser en el volumen de control:

$$d_w = \frac{4}{\pi} l_F \lambda / d_o \quad (1.11)$$

Ancho del volumen de control:

$$d_w = d_{lvc} / \cos \phi \quad (1.12)$$

Largo del volumen de control:

$$l_w = d_{lvc} / \text{sen } \phi \quad (1.13)$$

Número de franjas en el volumen de control:

$$N_f = \frac{4}{\pi} D / d_o \quad (1.14)$$

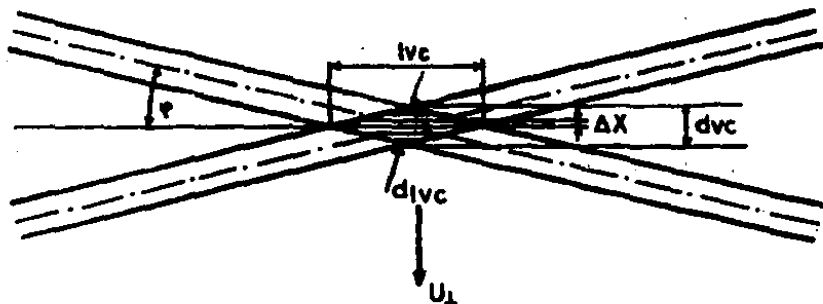


Figura 1.8. Dimensiones principales del volumen de control.

APENDICE II

MODELO PARA LA DETERMINACION DE LA VISIBILIDAD

El modelo de las franjas de Moire explica ciertas propiedades de la señal Doppler, pero resulta incompleto para determinar las variaciones de su visibilidad. No obstante, un análisis de la influencia de los parámetros geométricos de la óptica receptora en el comportamiento de la visibilidad resulta, aunque sea cualitativamente, muy útil para el diseño correcto del sistema para lograr los requerimientos de los criterios de discriminación.

Considérese un plano X - Y sobre el cual se proyectan las franjas de interferencia resultado de la presencia de una esfera transparente en el volumen de control. Dicho plano se sitúa perpendicularmente al eje óptico, y es suficientemente pequeño para considerar que la distancia de separación entre las franjas ΔX está dada por la expresión obtenida por Durst & Zaré (1975):

$$\Delta X = \left(1 + \left(\frac{2n_1}{n_2} - 2 \right) \frac{L}{R} \right) \frac{\lambda}{2 n_1 \sin \phi} \quad (II.1)$$

y que las variaciones de intensidad en la dirección Y son despreciables (ver Fig. II.1). De esta manera, se considera que la distribución de intensidad sobre dicho plano puede expresarse por:

$$I = I_0 \exp(-X^2 / S^2) (1 - \eta \sin(2\pi X / \Delta X)) \quad (II.2)$$

donde I_0 , S , y η son constantes que se determinarán experimentalmente.

La cantidad total de luz que recibe el fotomultiplicador se expresa como:

$$P_s \int_{X_d - A_a}^{X_d + A_a} I \, dF = 2I_0 B_a \int_{X_d - A_a}^{X_d + A_a} \exp(-X^2/S^2) \left(1 - \eta \sin\left(\frac{2\pi X}{\Delta X}\right) \right) dx \quad (II.3)$$

donde dF es un elemento diferencial de área dentro de la apertura:

$$dF = 2 B dx \quad (11.4)$$

y X_d es la posición del centro de la apertura. (Ver Fig. 11.2).

Para el caso en el que la forma de la apertura es circular, se tiene:

$$dF = 2 (R_a^2 - (X - X_d)^2)^{1/2} \quad (11.5)$$

y por lo tanto, la cantidad total de luz es:

$$P_c = 2 I_0 \int_{X_d - R_a}^{X_d + R_a} \exp(-X^2/S^2) (1 - \eta \sin(2\pi X/\Delta X)) (R_a^2 - (X - X_d)^2)^{1/2} dx \quad (11.6)$$

Integrando las ecs. 11.3 o 11.6, se obtiene para una posición determinada del centro de la apertura y un tamaño de la misma dado, un valor de P_s o de P_c de la cantidad de luz integrada por el fotomultiplicador.

En este trabajo se realizó la integración de estas ecuaciones numéricamente utilizando el modelo de Romberg, el cual se describe claramente en el texto de Hildebrand (1982).

Al moverse la partícula con respecto al volumen de control, manteniendo su componente de velocidad U no nula (Fig. 11.1), se observa experimentalmente que las franjas de interferencia se "deslizan" sobre el plano $X - Y$ a lo largo del eje X con una rapidez U_f . Esto, para fines de análisis, resulta equivalente a mantener fija la posición de la partícula en el volumen de control, con lo cual se mantendría fijo el patrón de interferencia en el espacio, y mover la apertura a lo largo del eje X , lo cual se lograría variando el valor de X_d .

El resultado de integrar la ec. 11.6 para cada valor de X_d , desde un valor finito negativo a uno positivo se observa en la Fig. 3.2, y tiene la forma de una señal

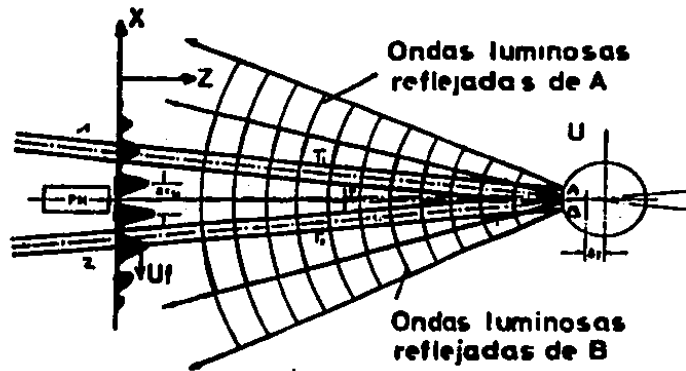


Figura II.1. Franjas de interferencia que resultan de la presencia de una esfera transparente en el centro del volumen de control y que se proyectan sobre un plano perpendicular al eje óptico del anemómetro.

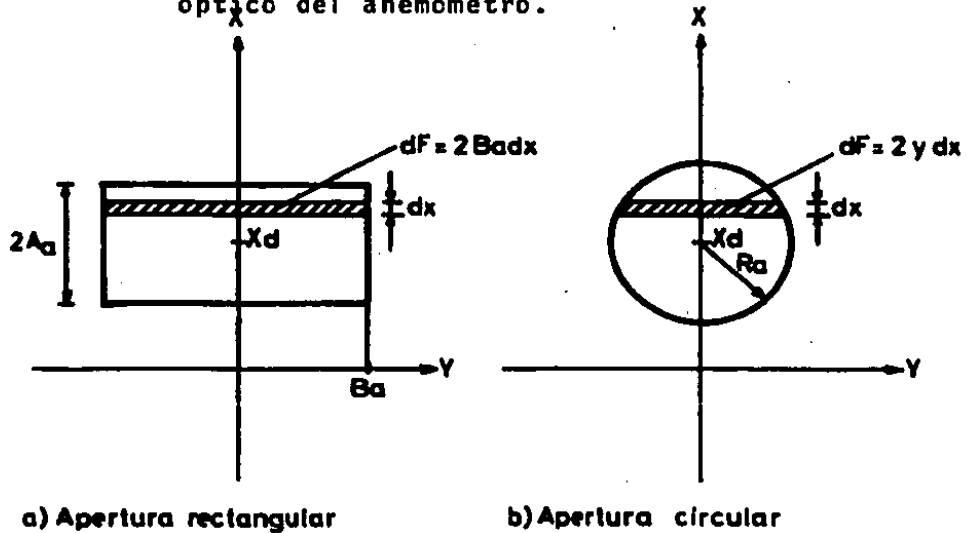


Figura II.2.

Doppler típica sin filtrar. De esta señal obtenida teóricamente, es posible también la evaluación de sus parámetros característicos, como son por ejemplo su amplitud máxima y su visibilidad.

Utilizando el modelo descrito, se presenta en la Fig. 3.5 la forma en que varía la visibilidad de la señal en función del radio de la apertura R_{ap} . Los resultados obtenidos por medio de este esquema de integración se comparan con los experimentales que se describen en el Capítulo 3. (Las constantes I_0 , S y σ se escogieron de tal forma que la concordancia entre ambos resultados fuera la mejor posible).

En las siguientes páginas se presenta el diagrama de flujo y codificación en FORTRAN 77 del programa utilizado para este propósito.

APENDICE III

III.1 Subrutina Amp 2.

Esta subrutina forma parte de un programa para medir flujos con partículas en suspensión, desarrollado por el Instituto de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Erlangen, R.F.A. y diseñado para operar con la grabadora IWATSU modelo DM-902. La descripción completa de este programa es parte del trabajo de Bock & Boerner (1984).

La subrutina fue diseñada específicamente para llevar a cabo la discriminación de las fases por amplitud, visibilidad o amplitud y visibilidad simultáneas, tal como se describe en la sección 3.2 de esta tesis.

Las variables de entrada y salida para esta subrutina son :

idis : variable entera de entrada que indica el tipo de discriminación que se realiza. Puede tomar los siguientes valores:

= 1 para discriminación por amplitud;

= 2 para discriminación por visibilidad;

= 3 para discriminación por amplitud-visibilidad.

ifl : variable entera de salida que toma los siguientes valores :

= 1 si la señal en cuestión proviene de un trazador;

= 2 si la señal en cuestión proviene de una partícula.

ivisi = visibilidad de la señal en cuestión (salida).

idc = variable que toma el valor de amplitud máxima de la señal en cuestión.

Se anexan el estructograma y codificación en FOLTRAN 77 de esta subrutina, los cuales se explican a continuación :

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

SUBROUTINA AMP 2		
Detección de la amplitud máxima	idc	1
SI	$idc < 128$	NO
Cálculo de la modulación		2
SI	$imax < 128$ $imin > -127$	NO
Cálculo de la visibilidad		%
Módulo de discriminación	3	
Salida: amplitud máxima visibilidad ifl { = 1 trazador = 2 partícula		

1 DETECCION DE LA AMPLITUD MAX.		
Inicilización de variables:	$imax = 1$ $idc = 0$	
De $i=1$ hasta $npts$		
SI	$id2(i) > id2(imax)$	NO
	$idc = id2(i)$	%
	$imax = i$	

2 CALCULO DE LA MODULACION

Inicialización de variables: $imin = 128$
 $imax = -127$

De $i = 1$ hasta $npts$

SI	$idl(i) < imin$	NO
	$imin = idl(i)$	∕
SI	$idl(i) > imax$	NO
	$imax = idl(i)$	∕
$modu = imax - imin$		

3 MODULO DE DISCRIMINACION

$ifl = 0$

$ldis$

= 1	SI	$idc > ldis$	NO
		$ifl = 2$ (partícula)	$ifl = 1$ (trazador)
= 2	SI	$ivisi < ldis(3)$	NO
		$ifl = 2$ (partícula)	$ifl = 1$ (trazador)
Otros	SI	$idc > ldis(4)$ $ivisi < ldis(3)$	NO
		$ifl = 2$ (partícula)	∕
	SI	$idc < ldis(4)$ $ivisi > ldis(3)$	NO
		$ifl = 1$ (trazador)	∕

```

C *****
C * This subroutine separates the information coming from the gas   *
C * and solid phases. Three criteria can be employed:              *
C *     Amplitude Discrimination                                     *
C *     Visibility Discrimination                                  *
C *     Amplitude-Visibility Discrimination                        *
C * Exits:                                                         *
C *     Max. Amplitude Ch1                                       *
C *     Visibility                                               *
C *     Max. Amplitude Ch1                                       *
C *     Min. Amplitude Ch1                                       *
C * Bursts that saturate one of the channels of the transient recorder *
C * will be rejected.                                           *
C *                               Coded by: E. Manera              *
C *                               August 1986                      *
C *****
C
C Include /thomas/datalab/loccom.ftn
C     integer idc,imax,imin,imax,imodu,ivisi,i,id2,id1,ifl,idis,ldis,
C     #npts
C     real ftr,modu,ampftr,a1max,a2max,r1dc
C
C .....Max. Amplitude detection
C
C     imax=i
C     idc=0
C     do 10 i=1,npts
C         if (id2(i).gt.id2(imax)) then
C             idc=id2(i)
C             imax=i
C         endif
C 10  continue
C     if (idc.lt.128.and.idc.gt.0) then
C
C .....Modulation Calculation
C
C     imin=128
C     imax=-127
C     do 20 i=1,npts
C         if (id1(i).lt.imin) then
C             imin=id1(i)
C         endif
C         if (id1(i).gt.imax) then
C             imax=id1(i)
C         endif
C 20  continue
C     if (imax.lt.128.and.imin.gt.-127) then

```



```

c.....Visibility calculation
c
      ftr=aimax/a2max/ampftr
      modu=fttr*real(imax-imin)
      rldc=real(idc)
      ivisi=int(modu*100./(2.*rldc-modu))
c
c.....Discrimination Module
c
      if (idis.eq.1) then
c.....Amplitude Discrimination
          if (idc.gt.idis(4)) then
              ifl=2
          else
              ifl=1
          endif
          elseif (idis.eq.2) then
c.....Visibility Discrimination
              if (ivisi.lt.idis(3)) then
                  ifl=2
              else
                  ifl=1
              endif
          else
c.....Amplitude-Visibility Discrimination
              if (idc.gt.idis(4).and.ivisi.lt.idis(3)) then
                  ifl=2
              endif
              if (idc.le.idis(4).and.ivisi.ge.idis(3)) then
                  ifl=1
              endif
          endif
          write (1,1000) idc,ivisi,imax,imin
      endif
endif
return
1000 format ('Max. Amplitude (Ch. 2):',i4,/,
*          '          Visibility:',i4,/,
*          'Max. Amplitude (Ch. 1):',i4,/,
*          'Min. Amplitude (Ch. 2):',i4,/)
end

```

III.1.1. Detección de la amplitud máxima idc.

La detección de la amplitud máxima se lleva a cabo utilizando la información de la señal sin filtrar digitalizada proveniente del canal 2 de la grabadora IWATSU (Fig.3.1). Esta información se encuentra contenida en un vector denominado $id2(i)$, cuyos componentes contienen valores entre -127 y $+128$ ($-127 < id2(i) < +128$), correspondientes a la resolución vertical de 256 bit de la grabadora.

El número de componentes de este vector $npts$ depende de la frecuencia de digitalización seleccionada en la grabadora y es obtenido en la subrutina donde se evalúa la frecuencia de la señal Doppler. Este número es, por lo tanto, dato para esta subrutina.

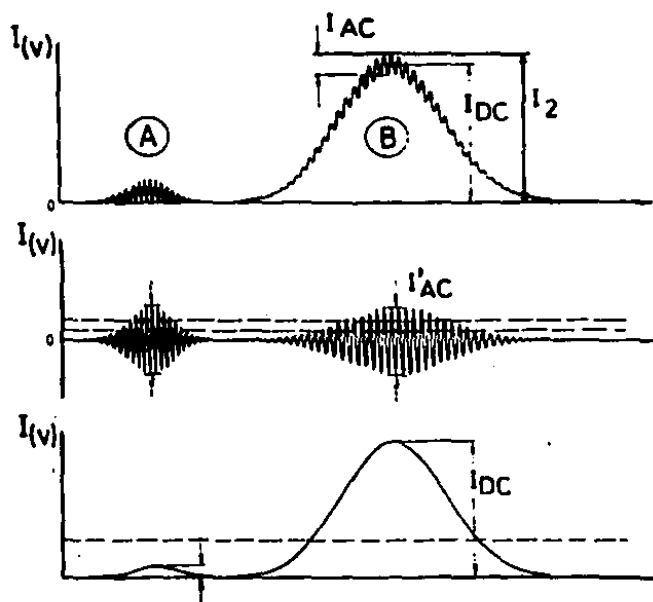
Mediante el ciclo iterativo del subestructograma 1, idc toma el valor del componente mayor del vector que corresponde a la amplitud máxima.

Las decisiones del estructograma principal evitan el procesamiento de señales que alcancen a saturar al canal 2 de la grabadora IWATSU.

III.1.2. Cálculo de la modulación.

Cuando la señal Doppler pasa a través del filtro variable pasabandas, se obtiene una señal como la de la Fig. III.1. La señal filtrada se introduce al canal 1 de la grabadora IWATSU y también se digitaliza. El vector $id1(i)$ contiene esta información.

La modulación de la señal filtrada se calcula después del ciclo iterativo indicado en el subestructograma 2, y es la diferencia entre los valores del componente mayor y menor del vector $id1(i)$. Este valor debe multiplicarse por el factor ftr para compensar la ganancia que tiene la señal al pasar por el filtro, de tal forma que esta modulación sea representativa del valor I_{ac} definido en la misma figura y en la Fig. 3.2.



señal sin filtrar (al canal 2)
vector id2(i)

componente de alta frecuencia (al canal 1).
vector id1(i)

componente de baja frecuencia

$$\text{visibilidad} = \frac{I'_{AC} \times \text{ftr}}{2I_2 - I'_{AC} \times \text{ftr}}$$

- (A) señal de un trazador
(B) señal de una partícula

Figura III.1. Filtrado de la señal Doppler y determinación de la visibilidad.

III.1.3. Cálculo de la visibilidad

Con los valores de amplitud máxima y modulación, es inmediato el cálculo de la visibilidad.

III.1.4. Módulo de discriminación

El tipo de discriminación que el usuario desea utilizar se asigna a través de la variable $idis$, tal como se indicó anteriormente. El módulo de discriminación del subestructograma 3 aplica las condicionantes para discriminación por amplitud, visibilidad o amplitud-visibilidad dependiendo del valor de $idis$ (sección 3.2.). Como resultado de esto se asigna un valor $if1 = 1$, si la señal proviene de un trazador o $if1 = 2$, si la señal proviene de una partícula.

Los componentes $ldis(4)$ y $ldis(3)$ del vector $ldis(i)$, corresponden respectivamente a los niveles de discriminación por amplitud I_a y por visibilidad Vis_a de la sección 3.2.

III.2. Programa EMO1

Este programa calcula la visibilidad de una señal Doppler utilizando el modelo presentado en el Apéndice II.

El estructograma presentado describe en forma simplificada la lógica de este programa. Además, se anexa codificación en FORTRAN 77 del programa principal y de sus subrutinas.

La subrutina DATOS proporciona todos los parámetros necesarios para efectuar la integración :

Parámetros de la distribución de intensidad luminosa :

1. Posición inicial del centro de la apertura x_{co} .
2. Constante de amplitud I_0 (ec.II.2).
3. Constante de modulación de baja frecuencia S (ec.II.2).
4. Constante de modulación de alta frecuencia η (ec.II.2).

Parámetros del velocímetro.

5. Longitud de onda de los rayos láser .
6. Angulo de intersección de los rayos láser .
7. Radio de la partícula R.
8. Índice de refracción de la partícula n_p .
9. Distancia del volumen de control a la óptica receptora.

Además :

10. Constante de convergencia de la integración.
11. Forma y dimensiones de la apertura.
12. Número de franjas sobre las que se debe integrar n.

El cálculo de la separación entre franjas se lleva a cabo por medio de la ec. II.1.

El ciclo iterativo permite variar la posición del centro de apertura X_d en un número de intervalos igual a 10 veces el número de franjas sobre las que se desea integrar ($10n$), a lo largo del eje X (ver Fig. II.2). El intervalo se calcula en función del valor de X y del número de franjas.

Si la constante $ifl1$ es :

- = 1 la forma de la apertura es rectangular.
- = 2 la forma de la apertura es circular.

Las constantes a y b corresponden a los límites del área de integración. En el caso de apertura rectangular :

$$\begin{aligned} a &= X_d - A_a \\ b &= X_d + A_a \end{aligned}$$

Para apertura circular :

$$\begin{aligned} a &= X_d - R_a \\ b &= X_d + R_a \end{aligned}$$

La subrutina ROMB calcula las integrales de las ecs. II.3 y II.6 utilizando el método de Romberg descrito en el texto de Hildebrand (1982). El programa comienza con integración trapezoidal con 10 intervalos.

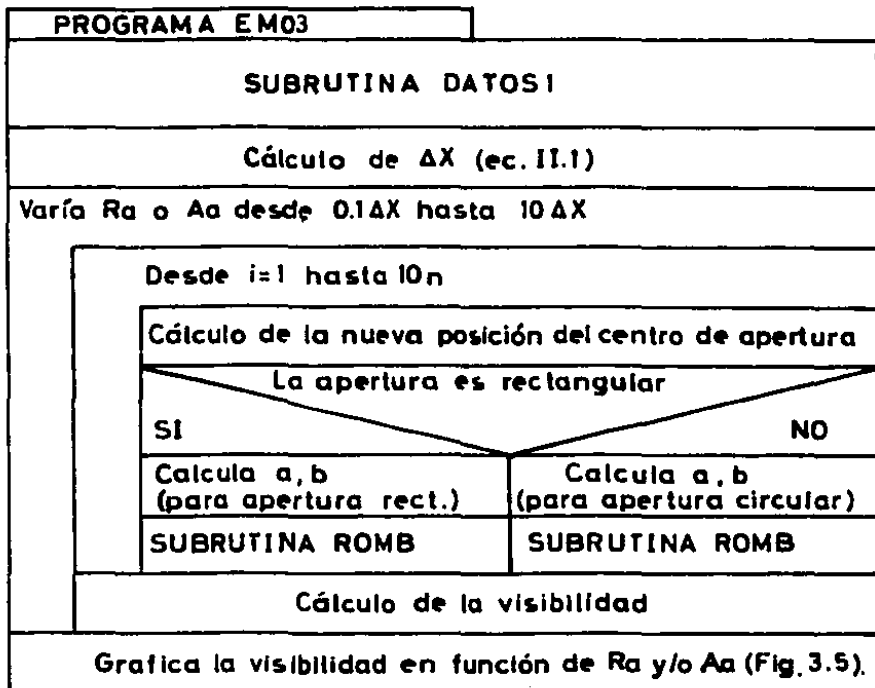
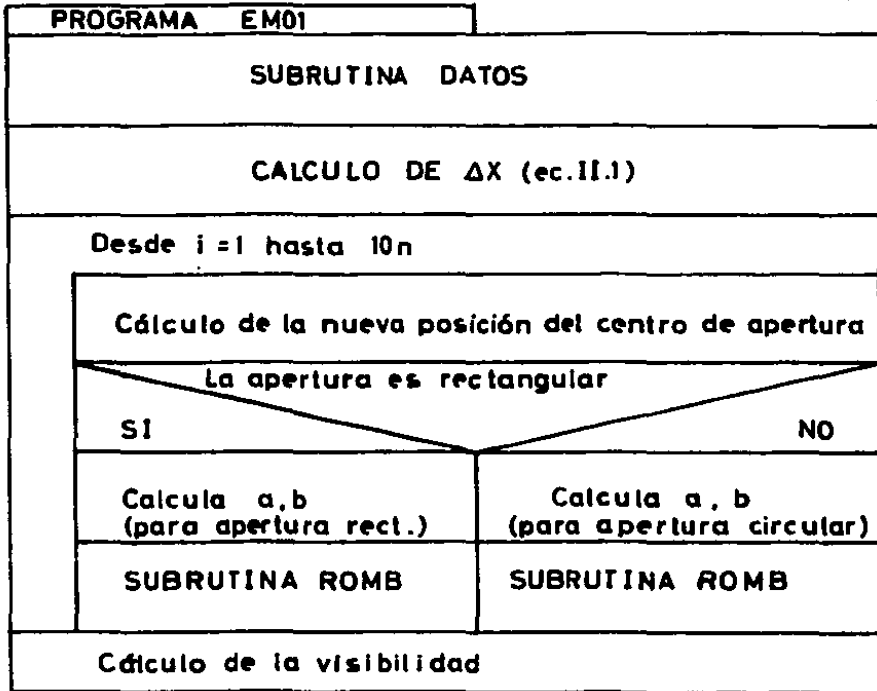
Luego se duplica el número de intervalos y los resultados se extrapolan para obtener el resultado.

A la salida del ciclo iterativo se tienen $10n$ valores de la cantidad total de luz que recibe el fotomultiplicador (P_s para apertura rectangular o P_c para circular). Si se grafican los valores obtenidos se obtiene la señal de la Fig. 3.2. De ella se puede calcular fácilmente su visibilidad.

III.3. Programa EMO3

Este programa es similar al EMO1. Su diferencia consiste en introducir un ciclo iterativo externo, que permite variar el tamaño de la apertura del lente receptor.

Para cada tamaño de apertura se obtiene un valor de visibilidad. El resultado se puede observar en la Fig. 3.5.



```

ftn7x,1
$files 0,3
    program EM01
C.....
C    Program EM01 calculates the visibility of an LDA signal as a
C    function of the particle radius and geometrical parameters of
C    the system.
C
C                                coded by E.Manero, March 1986.
C.....
#include /thomas/mexico/visibility/blcom.ftn
C.....evaluating some constants
C
    character*40 filed
    dimension ifiled(20)
    equivalence(filed,ifiled)
    5 call DATOS
    pi=3.1415926d0
    xco=rparm(1)/1000.d0
    ramp=rparm(2)
    sig=rparm(3)
    eta=rparm(4)
    wl=rparm(5)*1.d-9
    fi=rparm(6)*pi/180.d0
    r=rparm(7)*1.d-6
    refi=rparm(8)
    dcvo=rparm(9)/1000.d0
C.....fringe spacing
C
    delx=abs((1.d0+(2.d0/refi-2.d0)*dcvo/r)*wl)/(2.d0*sin(fi))
    write (1,10)
    10 format (///Enter total No. of fringes:_)
    read (1,*) n
    ntp=n*10
C.....main loop (moving fringes)
C
    do 20 i=1,ntp
    xl=xco-delx*((i-1.d0)/10.d0-n/2.d0)
C.....selection of aperture shape
C
    go to (30,40) iflag1
    30 br=ha/2000.d0
    ho=hi/2000.d0
    a=xl-ho
    b=xl+ho
    call ROMB (a,b,result)
    go to 50
    40 rap=ra/1000.d0
    a=xl-rap
    b=xl+rap
    call ROMB (a,b,result)
    50 p(i)=result
    20 continue

```



```

c.....max amplitude detection
c
      dc=0.d0
      imax=1
      do 60 i=1,ntp
      if (p(i)-p(imax)) 60,60,70
70    dc=p(i)
      imax=i
      60 continue
c
c.....visibility calculation
c
      do 80 i=imax,ntp,1
      if (p(i+1)-p(i)) 80,80,90
80    continue
      write (1,('Error in input parameters'))

      go to 110
90    acmin=p(i)
      if (acmin.lt.0.d0) acmin=0.d0
      vis=(dc-acmin)*100.d0/(dc+acmin)
      write (1,100) vis
100   format (//The visibility is:',f8.4,'%')
      write (1,130)
130   format (//Do you want to store signal? 1(yes) 2(no):_')
      read (1,*) inp1
      go to (115,140) inp1
115   write (1,('EM01: Enter output file name:'))
      read (1,150) ifiled
150   format (20A2)
      open (46,iostat=ios,file=ifiled,status='old',err=160)
      go to 170
160   write (1,('i8')) ios
      close (46)
      open (46,iostat=ios,file=ifiled,status='new',err=161)
      go to 170
161   write (1,('i8')) ios
      stop
170   do 180 i=1,ntp
      write (46,*) i,p(i)
180   continue
      close (46)
140   write (1,120)
120   format(//Do you want to make a new input? (1)yes (2)no:_')
      read (1,*) inp2
      go to (5,110)inp2
110   end

```

```

ftn7x,1
$files 0,3
    program EM03
C.....
C    Program EM03 calculates the visibility of an LDA signal as a
C    function of the particle radius and geometrical parameters of
C    the system. The aperture of the receiving lenses mask is
C    varied from 1 to 50 mm.
C                                coded by E.Manero, March 1986.
C.....
#include /thomas/mexico/visibility/hlcom.ftn
C.....evaluating some constants
C
    character*40 filed
    dimension ifiled(20)
    equivalence(filed,ifiled)
5 call DATOST
    pi=3.141592600
    xco=rparm(1)/1000.00
    ramp=rparm(2)
    sig=rparm(3)
    eta=rparm(4)
    w1=rparm(5)*1.D-9
    fi=rparm(6)*pi/180.00
    r=rparm(7)*1.D-6
    refi=rparm(8)
    dcvo=rparm(9)/1000.00
C.....fringe spacing
C
    delx=abs((1.00+(2.00/refi-2.00)*dcvo/r)*w1/(2.00*sin(fi)))
C....main loop (moving fringes)
C
    n=50
    ntp=500
    ra =000
    hi=000
    ba=5000
    do 10 ii=1,50
C    Write (1,*) iflag1
    go to (15,4) iflag1
    4 ra =ra +1
    go to 16
    15 hi=hi+1
    16 do 20 i=1,500
        x1 =xco-delx*((i-1.00)/10.00 -n/2.00)
C....selection of aperture shape
C
    go to (30,40) iflag1
    30 hr=ba/2000.00
    ho=hi/2000.00
    a=x1-ho
    b=x1+ho
    call RDMF (a,b,result)
    go to 50
    40 rap=ra/1000.00
    a=x1-rap
    b=x1+rap
    call ROME (a,b,result)
    50 p(i)=result
    20 continue

```

c.....max amplitude detection

```
c
  dc=0
  imax=1
  do 60 i=1,ntp
  if (p(i)-p(imax)) 60,60,70
70 dc=p(i)
  imax=i
```

60 continue

c.....visibility calculation

```
c
  do 80 i=imax,ntp,1
  if (p(i+1)-p(i)) 80,80,90
80 continue
  write (1,('Error in input parameters'))
  go to 110
90 acmin=p(i)
  if (acmin.lt.0) acmin=0
  visi(ii)=(dc-acmin)*100.00/(dc+acmin)
  write (1,*) ii,visi(ii)
10 continue
  write (1,130)
130 format(//'Do you want to store visibility? (1)yes (2)no:_' )
  read (1,*) inpl
  go to (115,140) inpl
115 write (1,('EM01: Enter output file name:_' ))
  read (1,150) ifiled
150 format (20A2)
  open (46,iostat=ios,file=ifiled,status='old',err=160)
  go to 170
160 write (1,('i8')) ios
  close (46)
  open (46,iostat=ios,file=ifiled,status='new',err=161)
  go to 170
161 write (1,('i8')) ios
  stop
170 do 180 i=1,50
  write (46,*)i,visi(i)
180 continue
  close (46)
140 write (1,120)
120 format(//'Do you want to make a new input? (1)yes (2)no:_' )
  read (1,*) inp2
  go to (5,110)inp2
110 end
```

```

f1n77,1
*files 0,3
  subroutine DATOS
C.....
c    DATOS provides the required input information for the
c    visibility calculation
c
c                                     Coded by E. Manero, March 1986
C.....
c
*include /thomas/mexico/visibility/blcom.ftn
  dimension ifild(20)
  character*40  fild
  equivalence (fild,ifild)
  write (1,5)
  5  format(//Do you want to read data file? (1)yes (2)no:_)
  read (1,*)inp
  go to (7,25) inp
  7  write(1,('Datos: Enter source data file:_''))
  read (1,10) ifild
  10 format (20A2)
  open (45,iostat=ios,file=ifild,status='old',err=52)
  go to 15
  52 write (1,('DATOS:Error opening input file'))
  write (1,('i8')) ios
  stop
  15 do 20 i=1,10
  read (45,*) rparm(i)
  20 continue
  close (45)
  25 write (1,30) rparm(1),rparm(2),rparm(3),rparm(4),rparm(5),
  *rparm(6),rparm(7),rparm(8),rparm(9),rparm(10)
  30 format (//
  *'INTENSITY DISTRIBUTION PARAMETERS'//
  *'1. Inicial position of the aperture center (mm):      ',d11.4/
  *'2. Amplitude Constant:                                ',d11.4/
  *'3. Low frequency modulation constant:                 ',d11.4/
  *'4. High frequency modulation constant:                ',d11.4//
  *'LDA PARAMETERS'//
  *'5. Wave length of laser beams (nm):                   ',d11.4/
  *'6. Intersection angle of beams (degrees):            ',d11.4/
  *'7. Particle radius (um):                              ',d11.4/
  *'8. Particle refractive index:                         ',d11.4/
  *'9. Distance from CV to receiving optics (mm):        ',d11.4/
  *'10. Integration tolerance:                            ',d11.4/
  *'11. Continue'//)
  write (1,40)
  40 format ('Enter desired task:_)
  read (1,*) ix
  if (ix.eq.11) go to 60
  write (1,50)
  50 format ('Enter desired value:_)
  read (1,*) rin
  rparm(ix)=rin
  go to 25
  60 write (1,70)

```

```
70 format (//  
  *'Enter shape of receiving lenses mask: '//  
  *'1. Rectangular      '//  
  *'2. Circular        '//  
  *'   Select desired task:_' )  
  read (1,*) iflag1  
  go to (A0,100) iflag1  
80 write (1,90)  
90 format (///'Input aperture dimensions: length,wide (mm):_' )  
  read (1,*) ha,hi  
  go to 120  
100 write (1,t10)  
110 format (///'Input aperture radius (mm):_' )  
  read (1,*) ra  
  
120 continue  
  return  
  end
```

```

ftn77,1
$files 0,3
      subroutine DATOS1
C.....
C      DATOS provides the required input information for the
C      visibility calculation
C
C                                     Coded by E. Manero, March 1986
C.....
C
$include /thomas/MEXICO/VISIBILITY/hlcom.ftn
      dimension ifild(20)
      character*40 fild
      equivalence (fild,ifild)
      write (1,5)
      5 format(// 'Do you want to read data file? (1)yes (2)no:_' )
      read (1,*)inp
      go to (7,25) inp
      7 write(1,(' ' DATOS: Enter source data file:_' ))
      read (1,10) ifild
      10 format (20A2)
      open (45,iostat=ios,file=ifild,status='old',err=52)
      go to 15
      52 write (1,(' ' DATOS:Error opening input file' ))
      write (1,('iA')) ios
      stop
      15 do 20 i=1,10
      read (45,*) rparm(i)
      20 continue
      close (45)
      25 write (1,30) rparm(1),rparm(2),rparm(3),rparm(4),rparm(5),
      *rparm(6),rparm(7),rparm(8),rparm(9),rparm(10)
      30 format (//
      *'INTENSITY DISTRIBUTION PARAMETERS'//
      *'1. Inicial position of the aperture center (mm):      ',D12.6/
      *'2. Amplitude Constant:                                ',D12.6/
      *'3. Low frequency modulation constant:                 ',D12.6/
      *'4. High frequency modulation constant:                 ',D12.6//
      *'LDA PARAMETERS'//
      *'5. Wave length of laser beams (nm):                    ',D12.6/
      *'6. Intersection angle of beams (degrees):             ',D12.6/
      *'7. Particle radius (um):                                ',D12.6/
      *'8. Particle refractive index:                           ',D12.6/
      *'9. Distance from CV to receiving optics (mm):         ',D12.6/
      *'10. Integration tolerance:                             ',D12.6/
      *'11. Continue'//)
      write (1,40)
      40 format ('Enter desired task:_' )
      read (1,*) ix
      if (ix.eq.11) go to 60
      write (1,50)
      50 format ('Enter desired values:_' )
      read (1,*) rin
      rparm(ix)=rin
      go to 25

```

```
60 write (1,70)
70 format (//
  *'Enter shape of receiving lenses mask: '//
  *'1. Rectangular      '//
  *'2. Circular         '//
  *'      Select desired task:_'
  read (1,*) iflag1
120 continue
  return
  end
```

```

f7n7x
$files 0,3
      subroutine ROMR (a,b,result)
C.....
C Subroutine for Romberg integration. Program begins with trapezoidal
C integration with 10 intervals. Intervals are then halved and the
C results are extrapolated up to 8th. order.
C                                     Coded by E. Manoro
C                                     March 1986.
C.....
C
Cinclude /thomas/mexico/visibility/hicom.f7n
      external fcn
      tol=rparm(10)
      kflag=1
C....
C.....compute first integral using trapezoidal rule
C
      h=(b-a)/10.00
C      write (1,*) a,b,ramp,br,eta,pi,deltx,sig,sqa
      sum=fcn(a,ramp,br,eta,pi,deltx,sig,sqa) + fcn(b,ramp,br,eta,pi,
      *deltx,sig,sqa)
      x=a
      do 10 i=2,10
        r=x+h
        if (iflag1.eq.1) go to 7
        sqa=(ramp**2.00-(x-r1)**2.00)**0.500
        7 if (iflag1.eq.1) sqa=1
          if (iflag1.eq.2) br=1
C      write (1,*) x,ramp,br,eta,pi,deltx,sig,sqa
      sum=sum+fcn(x,ramp,br,eta,pi,deltx,sig,sqa)*2.00
        10 continue
      trap(1,1)=h/2.00*sum
C.....
C.....recompute integral with h halved, extrapolate and test.
C.....repeat up to 8 times
C
      do 20 i=1,8
        h=h/2.00
        x=a+h
        k=10*2**i
        do 30 j=2,k,2
          if (iflag1.eq.1) go to 9
          sqa=(ramp**2.00-(x-x1)**2.00)**0.500
          9 if (iflag1.eq.1) sqa=1
            if (iflag1.eq.2) br=1
            sum=sum+fcn(x,ramp,br,eta,pi,deltx,sig,sqa)*2.00
            x=x+h+h
        30 continue
        trap(1,i+1)=h/2.00*sum
        do 40 l=1,i
          trap (1,i+1,i+l)=trap(1,i+1)+1.00/(4.00**l-1.00)*(trap(1,i+1)-
          *trap (1,i))
        40 continue
          if (abs(trap(i+1,i+1)-trap(i,i+1))-tol) 50,50,20
        20 continue

```



```

c....if tolerance not met after 8 extrapolations....
c
      kflg=0
      write (t,200)
200 format('tolerance not met')
c
c....print intermediate results
c
      50 i=i+1
c      do 70 l=1,i
c      do 80 j=1,l
c      write (1,203) trap(j,l)
c 203 format (1H , Bf12.6)

c 80 continue
c 70 continue
      if (kflg.eq.0) stop
      result=trap(i,j)
      return
      end
      double precision function fcn(x,ramp,br,eta,pi,delx,sig,sqa)
      implicit double precision(a-h,o-z)
      fcn=2.d0*ramp*br*(1.d0-eta*d0sin(2.d0*pi*x/delx))*
      *dexp(-(x/sig)**2.d0)*sqa
      return
      end

```

APENDICE IV

En este apéndice se presentan en forma tabular los resultados experimentales para flujos en una y dos fases descritos en el capítulo 4.

Los perfiles referidos como flujos en una fase corresponden a las gráficas de las Figs. 4.2 y 4.3. Los referidos como flujos con partículas en suspensión, a los de las Figs. 4.6 y 4.7.

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 1

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)
0.0000	12.0000	0.0000	722.9901
0.0000	11.0000	0.0000	907.2119
0.0000	10.0000	0.0000	974.9043
0.0000	9.0000	0.0000	1015.2400
0.0000	8.0000	0.0000	1016.2906
0.0000	7.0000	0.0000	981.6390
0.0000	6.0000	0.0000	905.9877
0.0000	5.0000	0.0000	692.0822
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	3.0000	0.0000	809.1940
0.0000	2.0000	0.0000	961.3992
0.0000	1.0000	0.0000	1034.5500
0.0000	0.0000	0.0000	1061.4109
0.0000	-1.0000	0.0000	1029.6799
0.0000	-2.0000	0.0000	965.6139
0.0000	-3.0000	0.0000	803.1362
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	-5.0000	0.0000	739.4124
0.0000	-6.0000	0.0000	898.5509
0.0000	-7.0000	0.0000	978.4828
0.0000	-8.0000	0.0000	1005.3540
0.0000	-9.0000	0.0000	993.7015
0.0000	-10.0000	0.0000	928.7587
0.0000	-11.0000	0.0000	815.6873
0.0000	-12.0000	0.0000	595.7836

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 2

X (mm)	Y (mm)		Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)
20.0000	12.0000	0.0000	687.0765	119.3475
20.0000	11.0000	0.0000	797.4406	104.4228
20.0000	10.0000	0.0000	887.3715	86.4452
20.0000	9.0000	0.0000	942.7820	66.7588
20.0000	8.0000	0.0000	959.3280	59.6915
20.0000	7.0000	0.0000	923.6782	73.5583
20.0000	6.0000	0.0000	855.4827	83.7893
20.0000	5.0000	0.0000	748.3582	97.4747
20.0000	4.0000	0.0000	723.0990	83.2049
20.0000	3.0000	0.0000	804.9890	103.7979
20.0000	2.0000	0.0000	908.0768	94.9757
20.0000	1.0000	0.0000	983.2979	71.1609
20.0000	0.0000	0.0000	1001.9819	61.4295
20.0000	-1.0000	0.0000	970.6044	78.2380
20.0000	-2.0000	0.0000	859.4402	96.6122
20.0000	-3.0000	0.0000	783.2375	95.7771
20.0000	-4.0000	0.0000	727.9800	81.3905
20.0000	-5.0000	0.0000	773.9709	99.6570
20.0000	-6.0000	0.0000	859.3203	98.7241
20.0000	-7.0000	0.0000	930.2078	70.5686
20.0000	-8.0000	0.0000	948.0715	65.1660
20.0000	-9.0000	0.0000	910.1051	82.0775
20.0000	-10.0000	0.0000	841.8333	101.9175
20.0000	-11.0000	0.0000	730.1115	118.7902
20.0000	-12.0000	0.0000	551.7197	131.9853

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 3

X (mm)	Y (mm)		U _g (cm/s)	U _{g,ms} (cm/s)
100.0000	12.0000	0.0000	638.4384	114.2512
100.0000	11.0000	0.0000	748.3884	85.9087
100.0000	10.0000	0.0000	809.9834	69.4773
100.0000	9.0000	0.0000	848.2274	58.9793
100.0000	8.0000	0.0000	870.5824	51.1647
100.0000	7.0000	0.0000	876.5920	46.0835
100.0000	6.0000	0.0000	870.1972	46.1105
100.0000	5.0000	0.0000	856.2466	42.2647
100.0000	4.0000	0.0000	865.9138	43.5563
100.0000	3.0000	0.0000	876.9873	46.4573
100.0000	2.0000	0.0000	896.3252	49.1420
100.0000	1.0000	0.0000	915.2574	47.8638
100.0000	0.0000	0.0000	922.4043	48.2956
00.0000	-1.0000	0.0000	915.9047	46.1235
100.0000	-2.0000	0.0000	902.6277	47.8864
100.0000	-3.0000	0.0000	886.4294	45.4321
100.0000	-4.0000	0.0000	871.5659	42.4540
100.0000	-5.0000	0.0000	868.8855	39.8255
100.0000	-6.0000	0.0000	874.9093	42.9346
100.0000	-7.0000	0.0000	875.9618	43.3115
100.0000	-8.0000	0.0000	869.7738	51.1224
100.0000	-9.0000	0.0000	841.2994	62.9710
100.0000	-10.0000	0.0000	804.9429	69.2954
100.0000	-11.0000	0.0000	735.0281	92.0186
100.0000	-12.0000	0.0000	561.0630	128.9240

FLUJO EN UNA FASE.

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 4

X (mm)	Y (mm)		Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)
300.0000	12.0000	0.0000	556.1307	118.7200
300.0000	11.0000	0.0000	696.1333	86.5824
300.0000	10.0000	0.0000	755.8378	72.3549
300.0000	9.0000	0.0000	802.0911	64.5224
300.0000	8.0000	0.0000	838.7489	56.1202
300.0000	7.0000	0.0000	871.3931	46.0878
300.0000	6.0000	0.0000	893.6487	37.5099
300.0000	5.0000	0.0000	909.0796	32.2068
300.0000	4.0000	0.0000	921.5732	28.1179
300.0000	3.0000	0.0000	931.0421	23.5098
300.0000	2.0000	0.0000	936.0104	22.8940
300.0000	1.0000	0.0000	938.1643	21.4782
300.0000	0.0000	0.0000	939.0950	24.1014
300.0000	-1.0000	0.0000	938.1991	22.0378
300.0000	-2.0000	0.0000	939.1346	21.4977
300.0000	-3.0000	0.0000	930.9242	23.6760
300.0000	-4.0000	0.0000	922.4731	28.4156
300.0000	-5.0000	0.0000	908.4766	34.0233
300.0000	-6.0000	0.0000	889.4420	40.0090
300.0000	-7.0000	0.0000	863.1812	48.6207
300.0000	-8.0000	0.0000	831.0067	52.5514
300.0000	-9.0000	0.0000	792.9033	65.4934
300.0000	-10.0000	0.0000	752.3101	72.8874
300.0000	-11.0000	0.0000	688.3456	88.0416
300.0000	-12.0000	0.0000	509.7332	109.9759

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 5

X (mm)	Y (mm)		Ug (cm/s)	Ug _m (cm/s)
800.0000	12.0000	0.0000	540.3220	118.9205
800.0000	11.0000	0.0000	700.5973	97.7132
800.0000	10.0000	0.0000	760.5726	83.6760
800.0000	9.0000	0.0000	801.9501	75.3164
800.0000	8.0000	0.0000	828.6368	75.4700
800.0000	7.0000	0.0000	859.6403	69.8661
800.0000	6.0000	0.0000	884.8461	61.6807
800.0000	5.0000	0.0000	909.3210	57.6741
800.0000	4.0000	0.0000	926.2106	57.5606
800.0000	3.0000	0.0000	944.1405	51.2250
800.0000	2.0000	0.0000	960.0868	46.8172
800.0000	1.0000	0.0000	969.0887	42.7581
800.0000	0.0000	0.0000	979.0375	40.5185
800.0000	-1.0000	0.0000	968.7466	42.2921
800.0000	-2.0000	0.0000	961.0471	46.1447
800.0000	-3.0000	0.0000	948.3438	49.5727
800.0000	-4.0000	0.0000	930.0018	55.9552
800.0000	-5.0000	0.0000	906.3817	58.5232
800.0000	-6.0000	0.0000	883.4724	62.8779
800.0000	-7.0000	0.0000	859.9001	69.1710
800.0000	-8.0000	0.0000	832.6235	70.7649
800.0000	-9.0000	0.0000	801.7451	75.6360
800.0000	-10.0000	0.0000	759.9302	81.9010
800.0000	-11.0000	0.0000	707.9757	95.3039
800.0000	-12.0000	0.0000	573.5824	118.3420

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 6

X (mm)	Y (mm)		Ug (cm/s)	Ug _m (cm/s)
1050.0000	12.0000	0.0000	575.7118	120.6412
1050.0000	11.0000	0.0000	710.4526	97.4032
1050.0000	10.0000	0.0000	771.5752	79.5843
1050.0000	9.0000	0.0000	807.1863	72.6502
1050.0000	8.0000	0.0000	831.3611	71.9154
1050.0000	7.0000	0.0000	860.6678	65.7824
1050.0000	6.0000	0.0000	806.8270	61.0956
1050.0000	5.0000	0.0000	904.8289	57.0104
1050.0000	4.0000	0.0000	918.2124	55.9786
1050.0000	3.0000	0.0000	935.6838	46.7501
1050.0000	2.0000	0.0000	943.8636	46.4774
1050.0000	1.0000	0.0000	953.4399	39.9185
1050.0000	0.0000	0.0000	958.0505	40.6889
1050.0000	-1.0000	0.0000	952.6265	41.8603
1050.0000	-2.0000	0.0000	944.9941	45.7148
1050.0000	-3.0000	0.0000	933.6123	48.3543
1050.0000	-4.0000	0.0000	918.0714	52.9743
1050.0000	-5.0000	0.0000	901.6901	57.8935
1050.0000	-6.0000	0.0000	878.6108	62.9940
1050.0000	-7.0000	0.0000	855.1071	66.3833
1050.0000	-8.0000	0.0000	828.0649	71.1745
1050.0000	-9.0000	0.0000	797.1447	77.5194
1050.0000	-10.0000	0.0000	753.5313	83.5084
1050.0000	-11.0000	0.0000	701.4445	97.2986
1050.0000	-12.0000	0.0000	503.1718	119.0497

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 1

X (mm)	Y (mm)		U _g (cm/s)	U _{g_m} (cm/s)
0.0000	12.0000	0.0000	410.0902	125.1963
0.0000	11.0000	0.0000	605.7739	125.5983
0.0000	10.0000	0.0000	693.5927	64.2213
0.0000	9.0000	0.0000	718.4985	40.1365
0.0000	8.0000	0.0000	720.3373	36.5068
0.0000	7.0000	0.0000	703.7623	51.0358
0.0000	6.0000	0.0000	628.1271	110.6215
0.0000	5.0000	0.0000	384.1418	111.9988
0.0000	3.0000	0.0000	877.7014	123.5984
0.0000	2.0000	0.0000	996.3345	98.5374
0.0000	1.0000	0.0000	1068.3516	82.9455
0.0000	0.0000	0.0000	1093.9763	66.1608
0.0000	-1.0000	0.0000	1068.1484	77.4973
0.0000	-2.0000	0.0000	1002.0731	96.3415
0.0000	-3.0000	0.0000	883.4872	117.2670
0.0000	-5.0000	0.0000	447.5170	111.0290
0.0000	-6.0000	0.0000	667.2783	93.4298
0.0000	-7.0000	0.0000	719.7670	42.8100
0.0000	-8.0000	0.0000	729.4158	38.8636
0.0000	-9.0000	0.0000	726.5631	42.0842
0.0000	-10.0000	0.0000	693.0480	81.1574
0.0000	-11.0000	0.0000	556.7461	145.5796
0.0000	-12.0000	0.0000	305.6990	92.0023
0.0000	-11.5000	0.0000	518.4990	137.7697
0.0000	-11.5000	0.0000	443.2634	111.8137

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 2

X (mm)	Y (mm)		U _g (cm/s)	U _{g_{max}} (cm/s)
20.0000	12.0000	0.0000	377.4286	98.3380
20.0000	11.0000	0.0000	452.9879	109.0584
20.0000	10.0000	0.0000	563.1035	107.5311
20.0000	9.0000	0.0000	638.9471	72.5200
20.0000	8.0000	0.0000	654.8521	42.6800
20.0000	7.0000	0.0000	641.8312	66.0971
20.0000	6.0000	0.0000	568.0808	98.9361
20.0000	5.0000	0.0000	531.7743	102.3616
20.0000	4.0000	0.0000	669.7572	145.4873
20.0000	3.0000	0.0000	830.4951	114.8104
20.0000	2.0000	0.0000	943.1794	101.0608
20.0000	1.0000	0.0000	1015.9672	75.5764
20.0000	0.0000	0.0000	1036.1697	65.9251
20.0000	-1.0000	0.0000	1003.0410	80.7500
20.0000	-2.0000	0.0000	922.0273	103.1985
20.0000	-3.0000	0.0000	819.3645	113.7336
20.0000	-4.0000	0.0000	655.4448	137.9118
20.0000	-5.0000	0.0000	545.2562	101.5076
20.0000	-6.0000	0.0000	624.1196	87.1413
20.0000	-7.0000	0.0000	667.6877	51.1127
20.0000	-8.0000	0.0000	668.6418	48.4263
20.0000	-9.0000	0.0000	632.7683	86.0570
20.0000	-10.0000	0.0000	528.7992	112.7814
20.0000	-11.0000	0.0000	430.2029	86.7030
20.0000	-12.0000	0.0000	303.2222	77.3575
20.0000	11.5000	0.0000	418.7372	97.5458
20.0000	-11.5000	0.0000	363.1503	89.5307

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 3

X (mm)	Y (mm)		U _g (cm/s)	U _{g,ms} (cm/s)
100.0000	12.0000	0.0000	393.4340	81.1074
100.0000	11.0000	0.0000	454.2228	59.9204
100.0000	10.0000	0.0000	493.2526	62.4880
100.0000	9.0000	0.0000	540.1548	77.3220
100.0000	8.0000	0.0000	611.3979	80.7829
100.0000	7.0000	0.0000	674.8942	70.1332
100.0000	6.0000	0.0000	714.1869	70.0440
100.0000	5.0000	0.0000	751.5139	70.0171
100.0000	4.0000	0.0000	786.8077	70.1648
100.0000	3.0000	0.0000	821.7266	73.9791
100.0000	2.0000	0.0000	857.3689	71.2302
100.0000	1.0000	0.0000	877.6306	68.0599
100.0000	0.0000	0.0000	889.5758	64.2822
100.0000	-1.0000	0.0000	879.9338	68.0985
100.0000	-2.0000	0.0000	856.0927	69.0356
100.0000	-3.0000	0.0000	820.6678	70.2070
100.0000	-4.0000	0.0000	783.2070	68.1029
100.0000	-5.0000	0.0000	742.5726	66.7016
100.0000	-6.0000	0.0000	710.5065	64.2625
100.0000	-7.0000	0.0000	665.5852	71.3118
100.0000	-8.0000	0.0000	609.4017	81.1636
100.0000	-9.0000	0.0000	540.9120	77.8072
100.0000	-10.0000	0.0000	487.9261	68.6106
100.0000	-11.0000	0.0000	429.0926	67.0621
100.0000	-12.0000	0.0000	296.4505	72.6160

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 4

X (mm)	Y (mm)		Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)
300.0000	12.0000	0.0000	391.4297	89.3786
300.0000	11.0000	0.0000	525.4905	109.6203
300.0000	10.0000	0.0000	605.2791	104.3004
300.0000	9.0000	0.0000	647.8839	88.5591
300.0000	8.0000	0.0000	681.9523	71.2844
300.0000	7.0000	0.0000	704.0126	64.8595
300.0000	6.0000	0.0000	716.3209	61.4559
300.0000	5.0000	0.0000	728.5634	60.4272
300.0000	4.0000	0.0000	742.0032	55.3425
300.0000	3.0000	0.0000	755.0264	49.3153
300.0000	2.0000	0.0000	769.0123	48.3324
300.0000	1.0000	0.0000	783.0653	45.5300
300.0000	0.0000	0.0000	788.4855	45.4615
300.0000	-1.0000	0.0000	777.7174	44.7789
300.0000	-2.0000	0.0000	770.7303	47.2537
300.0000	-3.0000	0.0000	749.1577	50.7147
300.0000	-4.0000	0.0000	755.7178	54.2902
300.0000	-5.0000	0.0000	744.2044	53.6284
300.0000	-6.0000	0.0000	728.5765	58.0229
300.0000	-7.0000	0.0000	727.9005	56.5072
300.0000	-8.0000	0.0000	706.0088	63.9004
300.0000	-9.0000	0.0000	683.7671	73.3024
300.0000	-10.0000	0.0000	656.0632	82.6889
300.0000	-11.0000	0.0000	609.1572	103.6490
300.0000	-12.0000	0.0000	492.5803	106.6369

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 5

X (mm)	Y (mm)		Ug (cm/s)	Ug _{ms} (cm/s)
800.0000	12.0000	0.0000	331.8209	94.4100
800.0000	11.0000	0.0000	560.3517	113.2623
800.0000	10.0000	0.0000	606.7524	84.5136
800.0000	9.0000	0.0000	677.2981	59.7611
800.0000	8.0000	0.0000	695.1339	50.6679
800.0000	7.0000	0.0000	713.0513	41.0613
800.0000	6.0000	0.0000	725.1337	40.8135
800.0000	5.0000	0.0000	735.0151	39.0056
800.0000	4.0000	0.0000	743.7106	39.0515
800.0000	3.0000	0.0000	747.2416	36.5375
800.0000	2.0000	0.0000	758.8438	32.8477
800.0000	1.0000	0.0000	760.1940	30.4272
800.0000	0.0000	0.0000	761.5038	30.1751
800.0000	-1.0000	0.0000	759.6879	31.4988
800.0000	-2.0000	0.0000	757.7805	30.7708
800.0000	-3.0000	0.0000	751.2410	33.3793
800.0000	-4.0000	0.0000	741.8713	36.5787
800.0000	-5.0000	0.0000	733.4556	39.5344
800.0000	-6.0000	0.0000	720.5823	42.2089
800.0000	-7.0000	0.0000	711.2988	43.1544
800.0000	-8.0000	0.0000	697.7867	48.9545
800.0000	-9.0000	0.0000	675.0082	59.9707
800.0000	-10.0000	0.0000	631.1533	88.8963
800.0000	-11.0000	0.0000	532.7048	115.0449
800.0000	-12.0000	0.0000	349.3367	89.2829

FLUJO EN UNA FASE

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 6

X (mm)	Y (mm)		U _g (cm/s)	U _{g_{max}} (cm/s)
1050.0000	12.0000	0.0000	372.5861	90.4574
1050.0000	11.0000	0.0000	544.0477	111.5741
1050.0000	10.0000	0.0000	632.3730	86.8449
1050.0000	9.0000	0.0000	670.3198	59.4353
1050.0000	8.0000	0.0000	695.5452	49.6766
1050.0000	7.0000	0.0000	711.6232	44.2640
1050.0000	6.0000	0.0000	722.9304	41.8616
1050.0000	5.0000	0.0000	735.8157	39.7568
1050.0000	4.0000	0.0000	748.7289	38.1258
1050.0000	3.0000	0.0000	751.0049	35.4675
1050.0000	2.0000	0.0000	759.5879	32.2856
1050.0000	1.0000	0.0000	762.4273	30.0484
1050.0000	0.0000	0.0000	765.8533	28.3238
1050.0000	-1.0000	0.0000	762.3241	30.4733
1050.0000	-2.0000	0.0000	757.3470	31.3434
1050.0000	-3.0000	0.0000	753.4893	35.1817
1050.0000	-4.0000	0.0000	745.2539	36.0642
1050.0000	-5.0000	0.0000	736.2410	38.7009
1050.0000	-6.0000	0.0000	724.3198	40.6428
1050.0000	-7.0000	0.0000	710.9064	45.2758
1050.0000	-8.0000	0.0000	696.5582	50.2170
1050.0000	-9.0000	0.0000	671.0913	63.5993
1050.0000	-10.0000	0.0000	630.6196	82.7507
1050.0000	-11.0000	0.0000	523.5160	111.0763
1050.0000	-12.0000	0.0000	361.0785	85.6178

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 1

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{max} (cm/s)	mpi (kg/s)	α (m ² /m ³)
0.000	-12.000	781.255	143.531	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-11.000	914.750	113.210	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-10.000	1005.119	77.535	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-9.000	1045.056	56.961	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-8.000	1043.298	57.377	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-7.000	1007.640	72.699	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-6.000	926.562	96.973	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-5.000	765.984	141.218	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-4.000	0.000	0.000	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-3.000	807.922	151.689	853.006	145.945	.4243E-05	.7803E-06
0.000	-2.000	964.361	103.631	964.719	136.726	.5624E-05	.9144E-06
0.000	-1.000	1036.623	80.205	1014.554	121.679	.6237E-05	.9644E-06
0.000	0.000	1068.124	73.105	1040.632	112.564	.6646E-05	.1002E-05
0.000	1.000	1046.951	74.588	1015.283	123.929	.6442E-05	.9953E-06
0.000	2.000	967.625	100.656	967.312	122.791	.6093E-05	.9793E-06
0.000	3.000	826.820	141.476	854.781	144.762	.4243E-05	.7787E-06
0.000	4.000	0.000	0.000	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	5.000	777.578	141.898	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	6.000	931.061	107.582	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	7.000	1020.550	73.699	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	8.000	1049.594	59.253	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	9.000	1029.184	73.632	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	10.000	971.238	97.074	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	11.000	868.123	128.977	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	12.000	679.828	153.871	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 2

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{res} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{res} (cm/s)	mP _i (kg/s)	α (m ³ /m ³)
20.000	-12.000	725.524	120.429	0.000	0.000	.00000E+00	.00000E+00
20.000	-11.000	842.007	104.504	0.000	0.000	.00000E+00	.00000E+00
20.000	-10.000	929.639	91.528	0.000	0.000	.00000E+00	.00000E+00
20.000	-9.000	990.124	67.310	0.000	0.000	.00000E+00	.00000E+00
20.000	-8.000	1007.500	61.170	0.000	0.000	.2128E-04	.00000E+00
20.000	-7.000	981.524	73.878	0.000	0.000	.3192E-06	.00000E+00
20.000	-6.000	903.523	100.494	0.000	0.000	.3192E-04	.00000E+00
20.000	-5.000	813.494	97.531	782.691	95.582	.7447E-06	.1492E-06
20.000	-4.000	754.476	81.460	789.718	87.797	.1596E-05	.3170E-04
20.000	-3.000	802.492	94.348	864.812	107.660	.3404E-05	.6175E-06
20.000	-2.000	906.371	101.093	949.024	101.797	.4468E-05	.7385E-06
20.000	-1.000	992.625	82.570	996.125	104.195	.5213E-05	.8209E-06
20.000	0.000	1047.219	60.972	1018.422	100.240	.6277E-05	.9468E-06
20.000	1.000	1022.265	71.561	1010.806	93.135	.5319E-05	.8255E-06
20.000	2.000	944.777	94.417	953.718	99.714	.4575E-05	.7524E-06
20.000	3.000	844.965	95.807	882.445	106.072	.3617E-05	.6430E-06
20.000	4.000	777.937	83.738	792.289	77.886	.1915E-05	.3791E-06
20.000	5.000	804.406	93.699	784.297	91.945	.5319E-06	.1064E-06
20.000	6.000	873.564	101.930	0.000	0.000	.4255E-06	.00000E+00
20.000	7.000	980.281	77.902	0.000	0.000	.3192E-06	.00000E+00
20.000	8.000	1015.625	60.568	0.000	0.000	.2128E-04	.00000E+00
20.000	9.000	987.124	70.230	0.000	0.000	.00000E+00	.00000E+00
20.000	10.000	910.028	98.593	0.000	0.000	.00000E+00	.00000E+00
20.000	11.000	809.719	116.925	0.000	0.000	.00000E+00	.00000E+00
20.000	12.000	665.975	127.277	0.000	0.000	.00000E+00	.00000E+00

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 3

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{max} (cm/s)	mpi (kg/s)	α (m ³ /m ³)
100.000	-12.000	718.844	106.785	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	-11.000	816.625	81.367	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	-10.000	872.656	73.994	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	-9.000	916.937	62.611	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	-8.000	939.250	53.599	0.000	0.000	.5096E-06	.0000E+00
100.000	-7.000	945.000	48.289	0.000	0.000	.7617E-06	.0000E+00
100.000	-6.000	929.826	52.135	900.506	58.607	.1067E-05	.1958E-06
100.000	-5.000	914.967	47.465	892.093	50.898	.1676E-05	.2948E-06
100.000	-4.000	904.969	42.248	889.024	48.898	.2133E-05	.3764E-06
100.000	-3.000	908.606	43.354	898.904	51.195	.2591E-05	.4521E-06
100.000	-2.000	919.500	44.617	917.652	53.143	.3505E-05	.5991E-06
100.000	-1.000	935.906	45.421	939.047	51.117	.4419E-05	.7382E-06
100.000	0.000	949.389	44.249	955.434	53.654	.5029E-05	.8256E-06
100.000	1.000	947.647	45.878	951.402	53.537	.4572E-05	.7538E-06
100.000	2.000	938.719	45.449	941.578	53.373	.3657E-05	.6093E-06
100.000	3.000	923.460	43.666	921.344	51.515	.3048E-05	.5189E-06
100.000	4.000	914.248	41.753	903.804	53.443	.2286E-05	.3957E-06
100.000	5.000	916.464	44.888	895.908	51.002	.1524E-05	.2668E-06
100.000	5.000	926.968	44.345	901.941	58.607	.1219E-05	.2170E-06
100.000	7.000	935.012	46.486	0.000	0.000	.7619E-06	.0000E+00
100.000	8.000	932.235	52.951	0.000	0.000	.6096E-06	.0000E+00
100.000	9.000	904.894	63.213	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	10.000	861.820	75.277	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	11.000	800.144	89.605	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	12.000	659.652	125.242	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 4

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{max} (cm/s)	mpi (kg/s)	α (m ² /m ³)
300.000	-12.000	644.928	119.992	704.582	112.625	.5068E-06	.1128E-06
300.000	-11.000	770.338	85.441	779.766	87.996	.5068E-06	.1020E-06
300.000	-10.000	927.719	71.174	929.655	74.057	.5335E-06	.1198E-06
300.000	-9.000	870.494	63.111	873.906	66.717	.8869E-06	.1592E-06
300.000	-8.000	907.312	56.502	899.562	56.508	.1014E-05	.1768E-06
300.000	-7.000	937.312	46.701	922.969	46.695	.1267E-05	.2153E-06
300.000	-6.000	759.140	37.937	937.649	42.373	.1520E-05	.2544E-06
300.000	-5.000	973.719	29.778	949.968	35.077	.1901E-05	.3138E-06
300.000	-4.000	985.590	24.738	954.937	34.132	.2154E-05	.3538E-06
300.000	-3.000	989.750	20.633	961.359	27.620	.2407E-05	.3928E-06
300.000	-2.000	988.875	20.377	963.684	34.074	.2407E-05	.3919E-06
300.000	-1.000	989.062	20.081	966.873	29.045	.2471E-05	.4009E-06
300.000	0.000	990.617	19.378	966.654	30.984	.2788E-05	.4523E-06
300.000	1.000	992.869	18.199	968.734	30.674	.2661E-05	.4309E-06
300.000	2.000	993.256	19.204	967.434	30.184	.2661E-05	.4314E-06
300.000	3.000	996.257	19.675	966.592	31.257	.2534E-05	.4112E-06
300.000	4.000	991.031	22.375	961.672	32.289	.2407E-05	.3927E-06
300.000	5.000	985.588	26.461	958.030	35.693	.2154E-05	.3527E-06
300.000	6.000	973.062	35.422	946.906	39.259	.1901E-05	.3148E-06
300.000	7.000	948.625	44.603	931.789	46.873	.1267E-05	.2133E-06
300.000	8.000	920.429	52.201	911.656	54.625	.1140E-05	.1962E-06
300.000	9.000	881.999	61.947	874.468	66.963	.8869E-06	.1591E-06
300.000	10.000	833.375	72.730	836.152	75.773	.6335E-06	.1188E-06
300.000	11.000	767.187	92.424	778.000	93.520	.5068E-06	.1022E-06
300.000	12.000	535.371	122.020	678.875	127.004	.2534E-06	.5835E-07

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 5

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{max} (cm/s)	mpi (kg/s)	α (m ² /m ³)
650.000	-11.500	710.710	118.016	728.559	114.228	.4062E-06	.8746E-07
650.000	-11.000	762.309	104.207	767.250	104.978	.5416E-06	.1187E-06
650.000	-10.000	807.207	87.156	822.178	90.400	.8124E-06	.1550E-06
650.000	-9.000	867.656	82.410	863.531	81.147	.1151E-05	.2091E-06
650.000	-8.000	910.844	70.787	894.031	75.660	.1219E-05	.2138E-06
650.000	-7.000	942.218	65.918	928.655	67.621	.1354E-05	.2287E-06
650.000	-6.000	971.749	61.807	951.156	60.021	.1625E-05	.2680E-06
650.000	-5.000	993.250	55.070	973.817	57.014	.1625E-05	.2617E-06
650.000	-4.000	1018.486	48.096	993.030	50.957	.2099E-05	.3315E-06
650.000	-3.000	1037.795	44.531	1006.953	43.023	.2166E-05	.3375E-06
650.000	-2.000	1052.000	38.431	1015.347	49.509	.2302E-05	.3556E-06
650.000	-1.000	1064.062	30.755	1022.281	37.049	.2708E-05	.4155E-06
650.000	0.000	1068.844	27.419	1024.812	31.496	.2843E-05	.4352E-06
650.000	1.000	1067.564	29.095	1027.750	36.566	.2708E-05	.4133E-06
650.000	2.000	1060.312	34.377	1021.439	38.000	.2234E-05	.3431E-06
650.000	3.000	1042.594	45.260	1009.150	42.256	.2166E-05	.3367E-06
650.000	4.000	1026.937	50.074	1003.500	45.912	.2166E-05	.3386E-06
650.000	5.000	1004.125	55.478	982.464	54.137	.1760E-05	.2810E-06
650.000	6.000	977.748	61.320	961.441	62.275	.1489E-05	.2430E-06
650.000	7.000	944.219	69.449	928.265	67.931	.1489E-05	.2517E-06
650.000	8.000	909.689	72.625	894.750	75.617	.1422E-05	.2492E-06
650.000	9.000	866.623	81.488	860.934	85.137	.1286E-05	.2344E-06
650.000	10.000	820.363	88.898	812.156	93.176	.9478E-06	.1891E-06
650.000	11.000	733.937	110.898	738.594	116.736	.5416E-06	.1150E-06
650.000	11.500	644.156	131.693	686.164	127.904	.4062E-06	.9286E-07

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 1

PERFIL 6

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{max} (cm/s)	mpi (kg/s)	α (m³/m³)
1125.000	-11.500	722.968	124.359	742.873	115.513	.4058E-06	.8570E-07
1125.000	-11.000	781.347	106.242	778.586	105.730	.1015E-05	.2044E-06
1125.000	-10.000	844.809	89.238	825.400	92.781	.1218E-05	.2314E-06
1125.000	-9.000	885.941	84.723	864.561	85.892	.1319E-05	.2393E-06
1125.000	-8.000	922.811	76.877	897.625	81.006	.1623E-05	.2837E-06
1125.000	-7.000	947.437	71.531	923.654	72.227	.1623E-05	.2757E-06
1125.000	-6.000	970.132	69.339	943.800	70.753	.1826E-05	.3035E-06
1125.000	-5.000	990.498	62.119	964.658	62.059	.1623E-05	.2640E-06
1125.000	-4.000	1007.375	56.912	985.619	54.238	.1826E-05	.2907E-06
1125.000	-3.000	1023.873	53.221	998.436	51.435	.1826E-05	.2869E-06
1125.000	-2.000	1037.312	46.209	1007.465	47.406	.1928E-05	.3002E-06
1125.000	-1.000	1046.736	43.326	1014.184	44.835	.2029E-05	.3139E-06
1125.000	0.000	1050.399	40.425	1016.527	45.048	.2334E-05	.3601E-06
1125.000	1.000	1046.617	44.199	1014.625	45.699	.2232E-05	.3451E-06
1125.000	2.000	1039.030	45.834	1017.281	45.701	.1928E-05	.2987E-06
1125.000	3.000	1024.875	53.008	999.433	51.681	.1826E-05	.2866E-06
1125.000	4.000	1013.356	57.597	984.156	60.865	.1826E-05	.2911E-06
1125.000	5.000	994.914	60.714	968.148	61.191	.1623E-05	.2630E-06
1125.000	6.000	972.684	68.517	951.531	68.734	.1826E-05	.3011E-06
1125.000	7.000	947.594	72.746	922.750	73.605	.1826E-05	.3105E-06
1125.000	8.000	913.750	79.296	898.187	80.998	.1826E-05	.3190E-06
1125.000	9.000	879.250	82.185	862.984	88.432	.1218E-05	.2213E-06
1125.000	10.000	827.119	92.020	823.272	93.773	.1218E-05	.2320E-06
1125.000	11.000	762.172	113.955	759.320	111.113	.1015E-05	.2096E-06
1125.000	11.500	692.593	124.785	713.414	126.418	.5073E-06	.1115E-06

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 1

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{res} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{res} (cm/s)	mpi (kg/s)	α (m ³ /m ³)
0.000	-12.000	540.272	88.960	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-11.000	622.278	89.871	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-10.000	681.656	66.248	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-9.000	708.406	46.918	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-8.000	710.781	45.619	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-7.000	688.524	55.115	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-6.000	639.652	74.593	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-5.000	543.024	91.020	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-4.000	0.000	0.000	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	-3.000	786.437	149.224	868.125	134.289	.4275E-05	.7724E-06
0.000	-2.000	970.125	99.256	938.644	141.382	.5644E-05	.9433E-06
0.000	-1.000	1045.748	72.293	1003.851	127.281	.6267E-05	.9793E-06
0.000	0.000	1076.875	66.957	1025.156	119.852	.6848E-05	.1048E-05
0.000	1.000	1044.173	75.777	1010.988	119.873	.6350E-05	.9852E-06
0.000	2.000	976.882	95.316	948.031	135.391	.5686E-05	.9408E-06
0.000	3.000	788.687	158.757	866.686	133.218	.4399E-05	.7562E-06
0.000	4.000	0.000	0.000	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	5.000	549.082	87.734	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	6.000	629.218	78.242	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	7.000	676.022	51.393	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	8.000	693.746	43.680	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	9.000	682.965	54.197	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	10.000	642.186	77.887	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	11.000	573.687	88.459	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
0.000	12.000	474.795	76.263	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 2

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{res} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{res} (cm/s)	mPi (kg/s)	α (m ³ /m ³)
20.000	-12.000	484.468	75.170	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	-11.000	545.656	80.326	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	-10.000	594.155	72.089	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	-9.000	635.869	55.045	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	-8.000	655.593	45.518	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	-7.000	643.343	51.841	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	-6.000	608.460	66.460	0.000	0.000	.2288E-06	.0000E+00
20.000	-5.000	567.830	73.537	544.297	97.109	.5720E-06	.1393E-06
20.000	-4.000	603.347	90.472	723.414	112.617	.2116E-05	.4589E-06
20.000	-3.000	732.672	126.840	841.808	119.182	.4004E-05	.7461E-06
20.000	-2.000	868.289	123.703	917.465	110.270	.4805E-05	.8215E-06
20.000	-1.000	978.387	89.770	975.531	107.621	.5434E-05	.8738E-06
20.000	0.000	1019.181	63.171	1002.639	97.101	.5777E-05	.9039E-06
20.000	1.000	992.201	75.013	987.488	100.906	.5205E-05	.8269E-06
20.000	2.000	908.820	107.984	932.217	113.371	.4805E-05	.8085E-06
20.000	3.000	776.234	128.633	856.744	117.244	.3832E-05	.7017E-06
20.000	4.000	632.545	107.478	731.562	118.023	.1888E-05	.4047E-06
20.000	5.000	566.590	70.906	640.153	101.873	.5720E-06	.1402E-06
20.000	6.000	587.839	68.703	0.000	0.000	.2288E-06	.0000E+00
20.000	7.000	526.992	53.359	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	8.000	638.147	50.216	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	9.000	611.686	63.625	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	10.000	560.015	76.043	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	11.000	502.128	75.201	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
20.000	12.000	443.601	59.268	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 3

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{max} (cm/s)	mpi (kg/s)	α (m ³ /m ³)
100.000	-12.000	464.047	57.773	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	-11.000	507.378	58.984	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	-10.000	539.836	56.307	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	-9.000	569.094	51.878	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	-8.000	593.562	51.447	0.000	0.000	.2208E-06	.0000E+00
100.000	-7.000	623.217	50.709	657.078	66.047	.4416E-06	.1054E-06
100.000	-6.000	654.600	57.435	688.406	67.879	.8832E-06	.2013E-06
100.000	-5.000	689.899	65.605	726.265	69.761	.1380E-05	.2981E-06
100.000	-4.000	727.500	70.057	762.838	73.857	.1766E-05	.3632E-06
100.000	-3.000	765.125	71.765	802.269	78.492	.2429E-05	.4749E-06
100.000	-2.000	809.373	74.018	847.750	76.617	.3643E-05	.6741E-06
100.000	-1.000	841.437	68.494	873.414	71.488	.4747E-05	.8526E-06
100.000	0.000	860.869	62.732	886.316	66.728	.6072E-05	.1075E-05
100.000	1.000	861.441	63.501	885.016	66.410	.5078E-05	.9001E-06
100.000	2.000	842.406	69.445	867.597	71.822	.4416E-05	.7984E-06
100.000	3.000	808.820	72.680	833.147	77.170	.2981E-05	.5612E-06
100.000	4.000	767.420	75.586	797.281	80.023	.1937E-05	.3910E-06
100.000	5.000	720.437	72.572	760.236	80.984	.1656E-05	.3417E-06
100.000	6.000	678.875	70.781	714.981	74.578	.9936E-06	.2180E-06
100.000	7.000	634.934	63.824	668.187	76.062	.5520E-06	.1296E-06
100.000	8.000	597.687	56.671	0.000	0.000	.2208E-06	.0000E+00
100.000	9.000	560.766	57.140	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	10.000	521.019	56.837	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	11.000	490.351	60.242	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00
100.000	12.000	435.398	50.947	0.000	0.000	.0000E+00	.0000E+00

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 4

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{ms} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{ms} (cm/s)	mpi (kg/s)	α (m ³ /m ³)
300.000	-12.000	495.496	70.598	0.000	0.000	.4426E-06	.0000E+00
300.000	-11.000	536.150	70.400	555.250	79.645	.5164E-06	.1459E-06
300.000	-10.000	573.250	70.984	585.465	75.881	.5902E-06	.1581E-06
300.000	-9.000	602.936	68.066	616.203	73.066	.7377E-06	.1878E-06
300.000	-8.000	627.562	66.820	645.531	70.406	.8853E-06	.2151E-06
300.000	-7.000	654.528	66.852	665.437	71.113	.1180E-05	.2782E-06
300.000	-6.000	675.264	67.642	689.906	63.797	.1475E-05	.3355E-06
300.000	-5.000	695.719	63.039	709.875	62.098	.1992E-05	.4401E-06
300.000	-4.000	716.594	58.578	726.718	56.578	.2213E-05	.4777E-06
300.000	-3.000	736.094	56.775	740.842	52.748	.2361E-05	.4999E-06
300.000	-2.000	747.403	54.465	752.498	49.340	.2730E-05	.5690E-06
300.000	-1.000	757.558	46.728	760.906	44.615	.2803E-05	.5779E-06
300.000	0.000	768.123	43.429	763.094	42.097	.3098E-05	.6369E-06
300.000	1.000	761.531	45.755	761.968	44.365	.2951E-05	.6075E-06
300.000	2.000	756.093	49.652	760.123	47.684	.2803E-05	.5785E-06
300.000	3.000	744.460	54.744	753.000	52.130	.2656E-05	.5533E-06
300.000	4.000	730.215	58.012	740.875	53.529	.2213E-05	.4686E-06
300.000	5.000	714.641	60.052	723.531	57.906	.2066E-05	.4478E-06
300.000	6.000	691.367	63.246	706.024	64.209	.1771E-05	.3934E-06
300.000	7.000	670.547	67.199	684.265	65.589	.1180E-05	.2704E-06
300.000	8.000	646.187	68.449	662.343	69.589	.8853E-06	.2097E-06
300.000	9.000	618.469	74.042	634.344	74.546	.5902E-06	.1459E-06
300.000	10.000	593.625	73.492	603.390	79.135	.5164E-06	.1343E-06
300.000	11.000	549.936	80.516	572.531	81.662	.4426E-06	.1213E-06
300.000	12.000	452.531	66.727	0.000	0.000	.3689E-06	.0000E+00

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 5

X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{max} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{max} (cm/s)	mpi (kg/s)	α (m ³ /m ³)
650.000	-11.500	545.306	83.136	0.000	0.000	.3284E-06	.0000E+00
650.000	-11.000	584.686	81.666	582.531	81.379	.4379E-06	.1179E-06
650.000	-10.000	431.656	66.855	628.367	75.211	.9854E-06	.2460E-06
650.000	-9.000	660.031	63.978	652.836	66.324	.1314E-05	.3157E-06
650.000	-8.000	685.939	55.051	673.343	60.751	.1423E-05	.3316E-06
650.000	-7.000	701.361	54.314	692.851	54.537	.1642E-05	.3718E-06
650.000	-6.000	719.859	50.576	709.811	52.207	.1752E-05	.3871E-06
650.000	-5.000	733.047	46.025	725.851	46.046	.1752E-05	.3786E-06
650.000	-4.000	749.123	43.693	737.967	42.146	.1861E-05	.3956E-06
650.000	-3.000	756.847	40.712	744.186	42.102	.2080E-05	.4385E-06
650.000	-2.000	745.531	36.414	751.875	38.586	.2190E-05	.4568E-06
650.000	-1.000	771.410	34.291	757.961	34.232	.2299E-05	.4758E-06
650.000	0.000	776.244	35.263	761.195	34.906	.2299E-05	.4738E-06
650.000	1.000	772.684	32.867	761.078	33.635	.2299E-05	.4739E-06
650.000	2.000	771.492	33.797	754.715	35.998	.2080E-05	.4323E-06
650.000	3.000	764.927	35.434	749.399	38.177	.1971E-05	.4125E-06
650.000	4.000	757.469	41.779	742.343	41.664	.1861E-05	.3933E-06
650.000	5.000	746.312	45.189	733.988	45.199	.1861E-05	.3978E-06
650.000	6.000	730.156	48.376	720.906	50.132	.1752E-05	.3812E-06
650.000	7.000	711.031	51.939	695.593	57.018	.1642E-05	.3703E-06
650.000	8.000	686.394	60.484	680.904	59.949	.1588E-05	.3657E-06
650.000	9.000	661.953	62.810	655.736	67.605	.1423E-05	.3405E-06
650.000	10.000	624.358	74.277	630.094	77.613	.1314E-05	.3271E-06
650.000	11.000	559.113	85.082	582.094	84.084	.8759E-06	.2360E-06
650.000	11.500	507.763	84.136	0.000	0.000	.4379E-06	.0000E+00

FLUJO CON PARTICULAS EN SUSPENSION

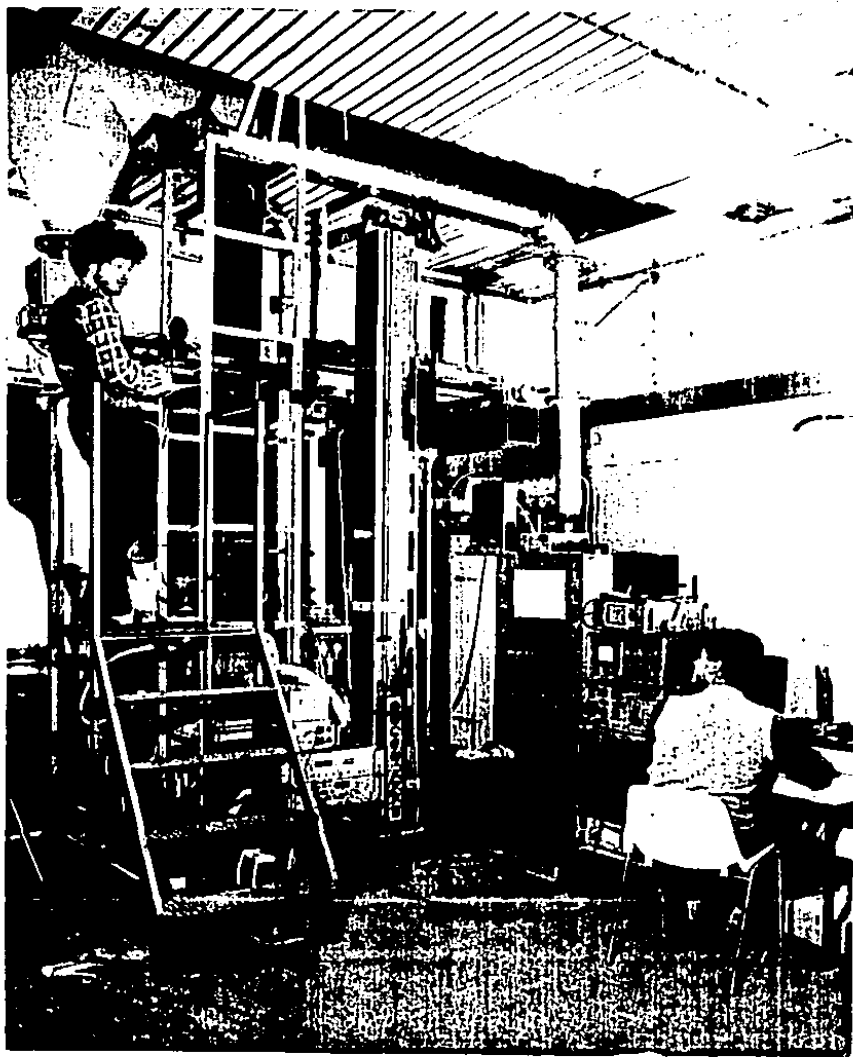
CASO DE ESTUDIO 2

PERFIL 6

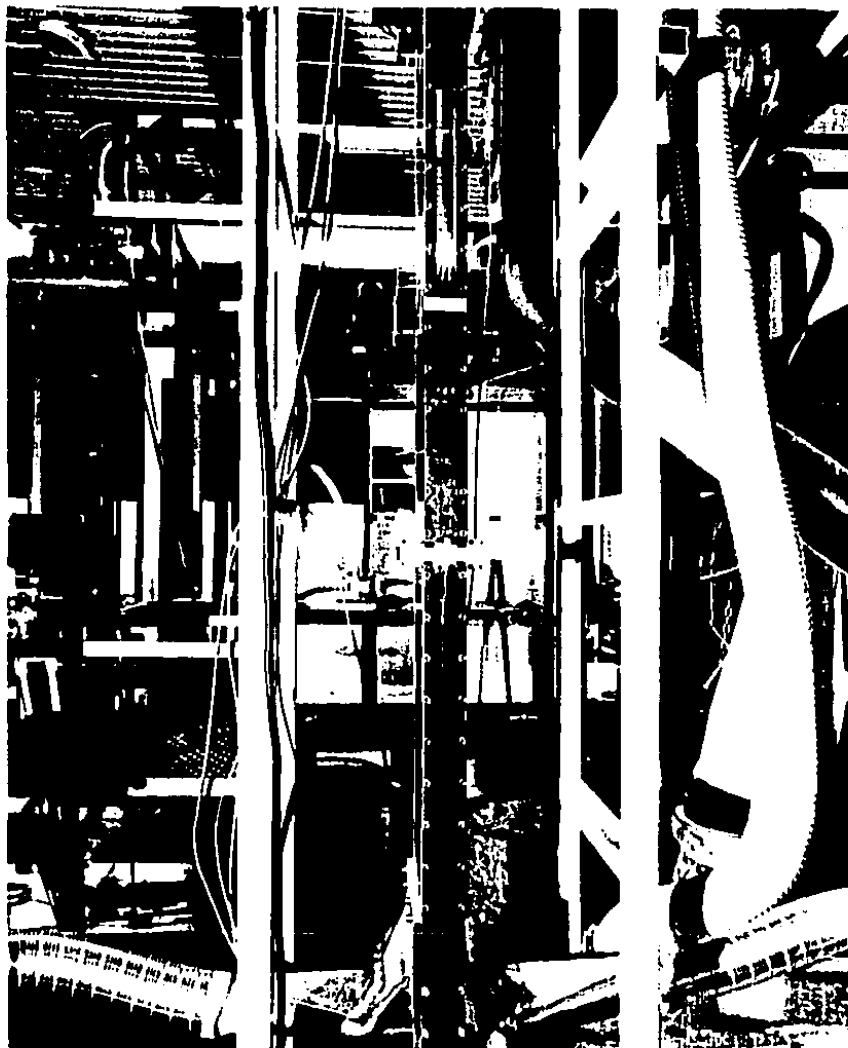
X (mm)	Y (mm)	Ug (cm/s)	Ug _{res} (cm/s)	Up (cm/s)	Up _{res} (cm/s)	mP1 (kg/s)	a (m ² /m ³)
1125.000	-11.500	543.125	84.738	562.719	89.855	.2125E-06	.5923E-07
1125.000	-11.000	567.312	80.918	590.894	83.900	.4250E-06	.1128E-06
1125.000	-10.000	637.498	69.459	634.187	76.727	.8499E-06	.2102E-06
1125.000	-9.000	668.891	63.602	662.281	68.984	.1062E-05	.2516E-06
1125.000	-8.000	691.205	60.005	691.148	63.369	.1169E-05	.2657E-06
1125.000	-7.000	713.838	56.767	705.904	58.904	.1381E-05	.3069E-06
1125.000	-6.000	736.562	51.604	727.375	53.439	.1806E-05	.3922E-06
1125.000	-5.000	752.875	50.891	744.203	45.802	.2231E-05	.4708E-06
1125.000	-4.000	765.625	45.184	754.030	46.388	.2337E-05	.4862E-06
1125.000	-3.000	775.622	42.574	760.934	44.212	.2231E-05	.4599E-06
1125.000	-2.000	787.570	38.195	771.894	40.949	.2337E-05	.4750E-06
1125.000	-1.000	792.390	35.535	777.481	39.115	.2337E-05	.4716E-06
1125.000	0.000	795.195	33.664	774.963	35.957	.2444E-05	.4933E-06
1125.000	1.000	792.816	34.890	774.617	38.789	.2337E-05	.4733E-06
1125.000	2.000	787.592	36.930	769.718	38.031	.2337E-05	.4763E-06
1125.000	3.000	778.631	38.771	764.112	41.310	.2337E-05	.4798E-06
1125.000	4.000	765.637	45.603	756.156	47.363	.2337E-05	.4849E-06
1125.000	5.000	752.672	48.279	743.297	50.822	.2231E-05	.4708E-06
1125.000	6.000	733.467	52.707	725.344	57.103	.2019E-05	.4365E-06
1125.000	7.000	717.203	55.848	710.092	55.684	.1487E-05	.3286E-06
1125.000	8.000	694.683	59.326	687.433	63.260	.1062E-05	.2424E-06
1125.000	9.000	665.775	65.353	663.203	69.379	.9562E-06	.2262E-06
1125.000	10.000	633.525	72.722	629.078	78.316	.7437E-06	.1854E-06
1125.000	11.000	582.641	84.382	581.528	85.682	.5312E-06	.1433E-06
1125.000	11.500	543.125	84.738	562.719	89.855	.2656E-06	.7404E-07

APENDICE V**FOTOGRAFIAS DEL EQUIPO EXPERIMENTAL**

Con el fin de proporcionar una imagen más completa de las características del equipo experimental, se presenta en este apéndice una serie de fotografías tomadas en el Instituto de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Erlangen, R.F.A.



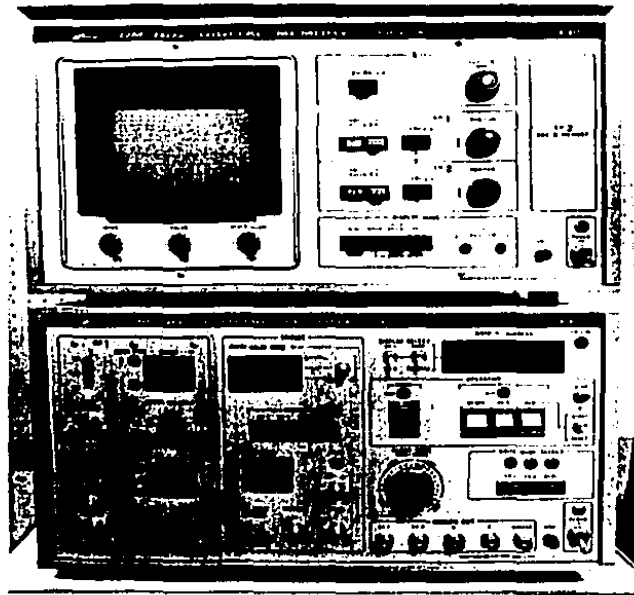
Vista panorámica del equipo experimental.



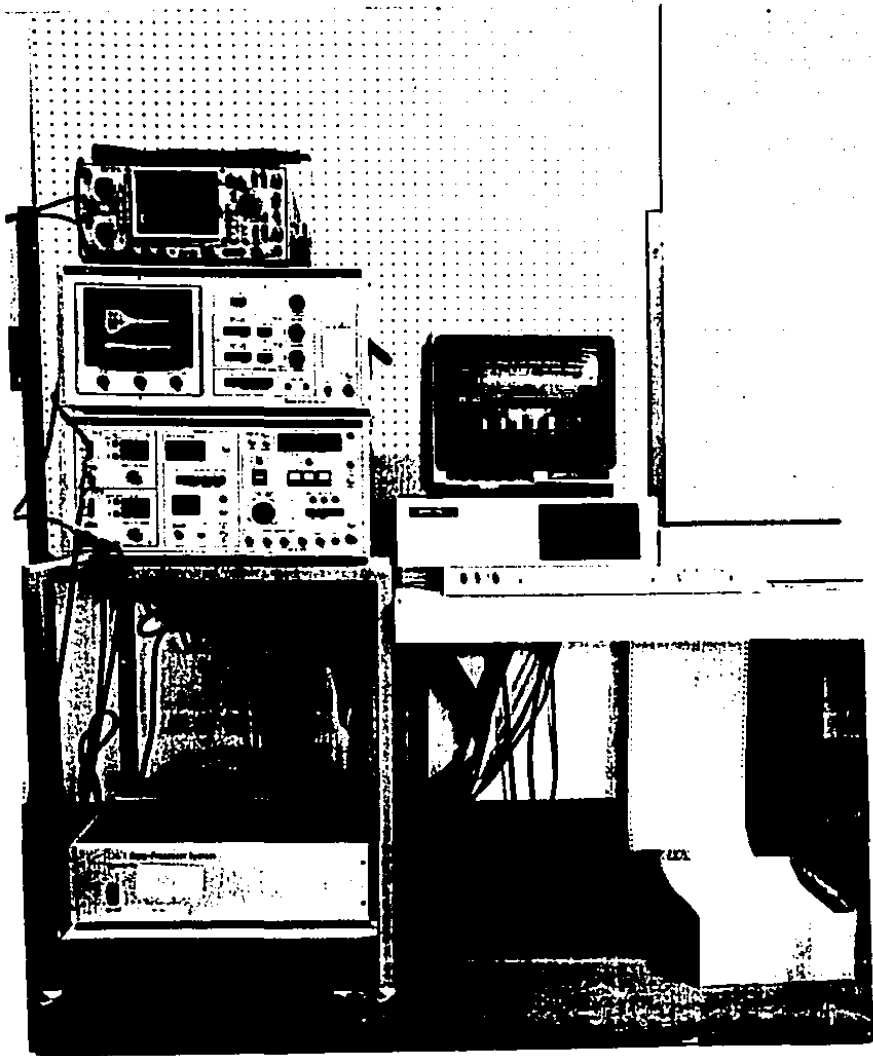
Sección de medición.



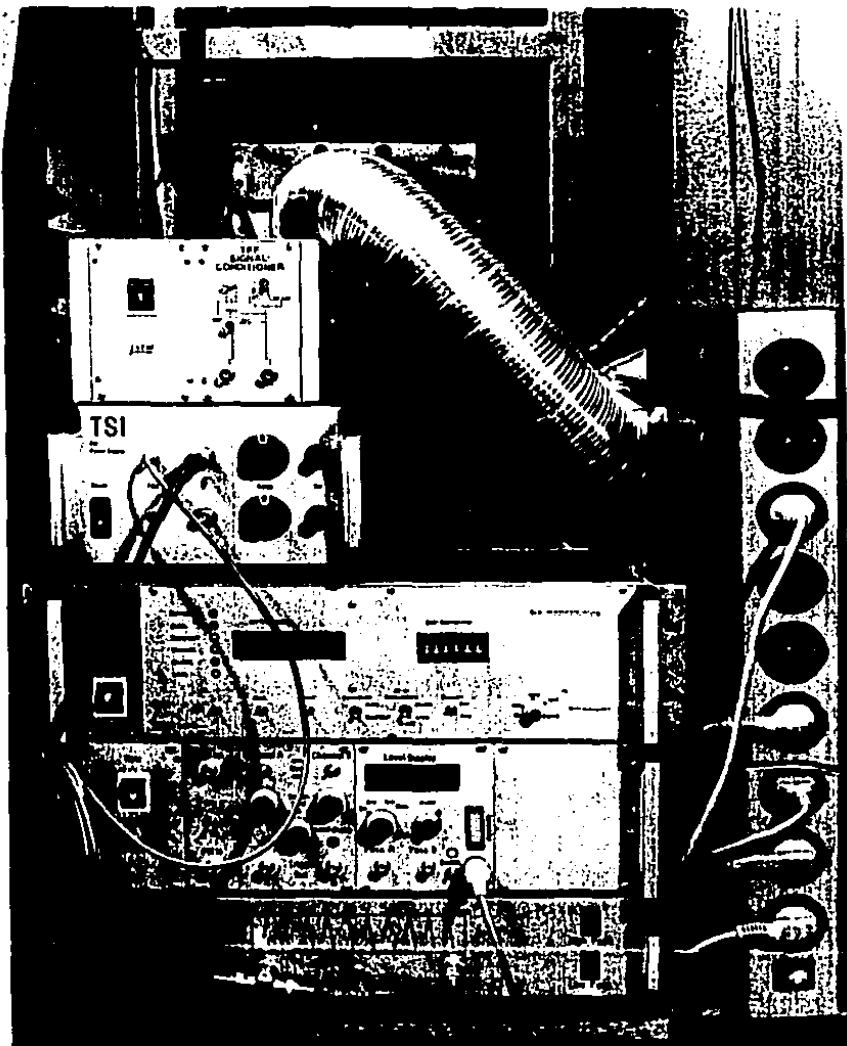
Velocímetro láser-Doppler y su mecanismo para movimiento tridireccional.



Grabadora IWATSU modelo DM-902

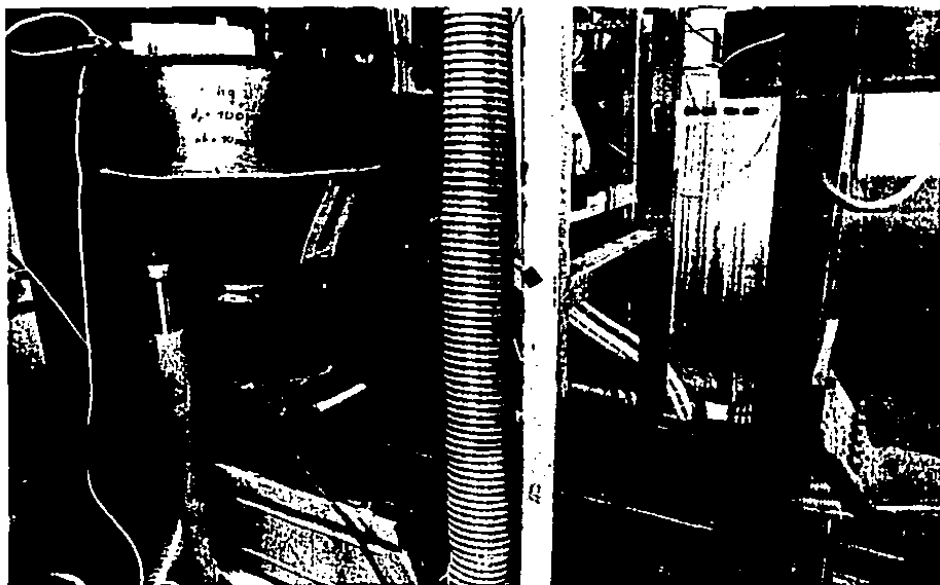


Grabadora IWATSU conectada a un microcomputador personal compatible con IBM-PC.

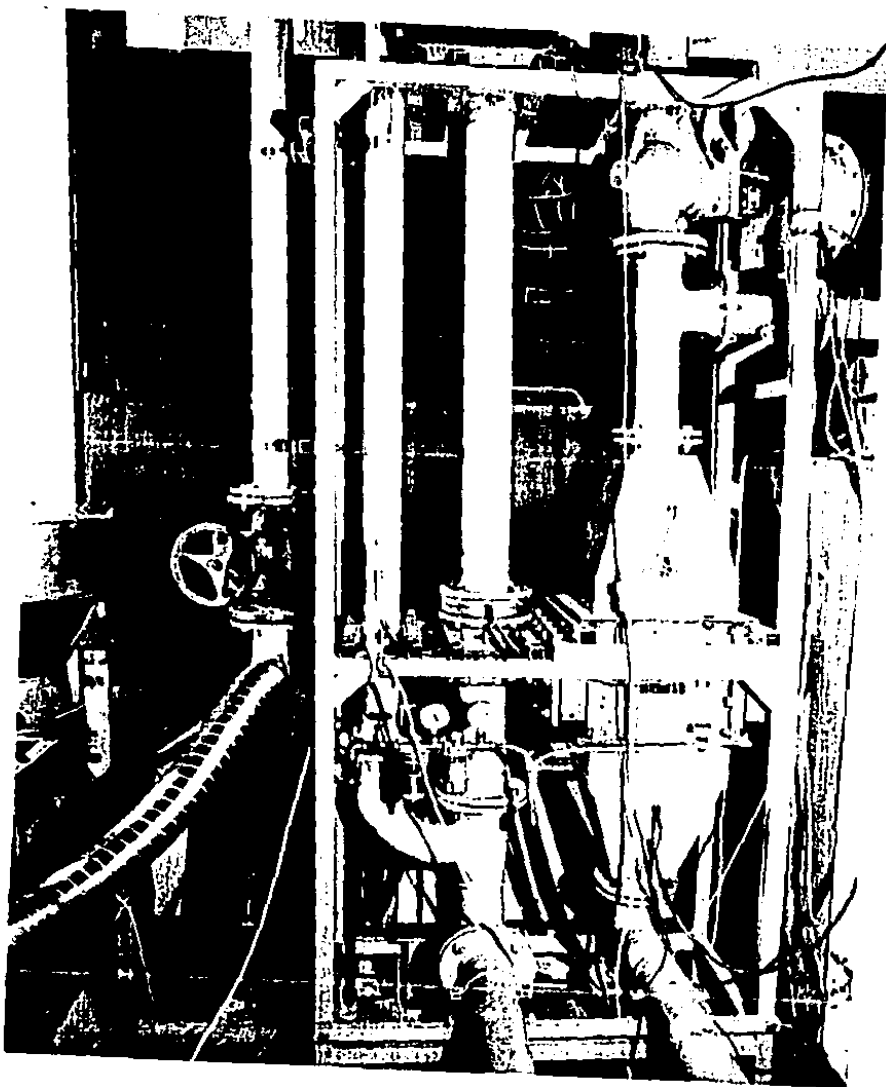


De arriba a abajo :

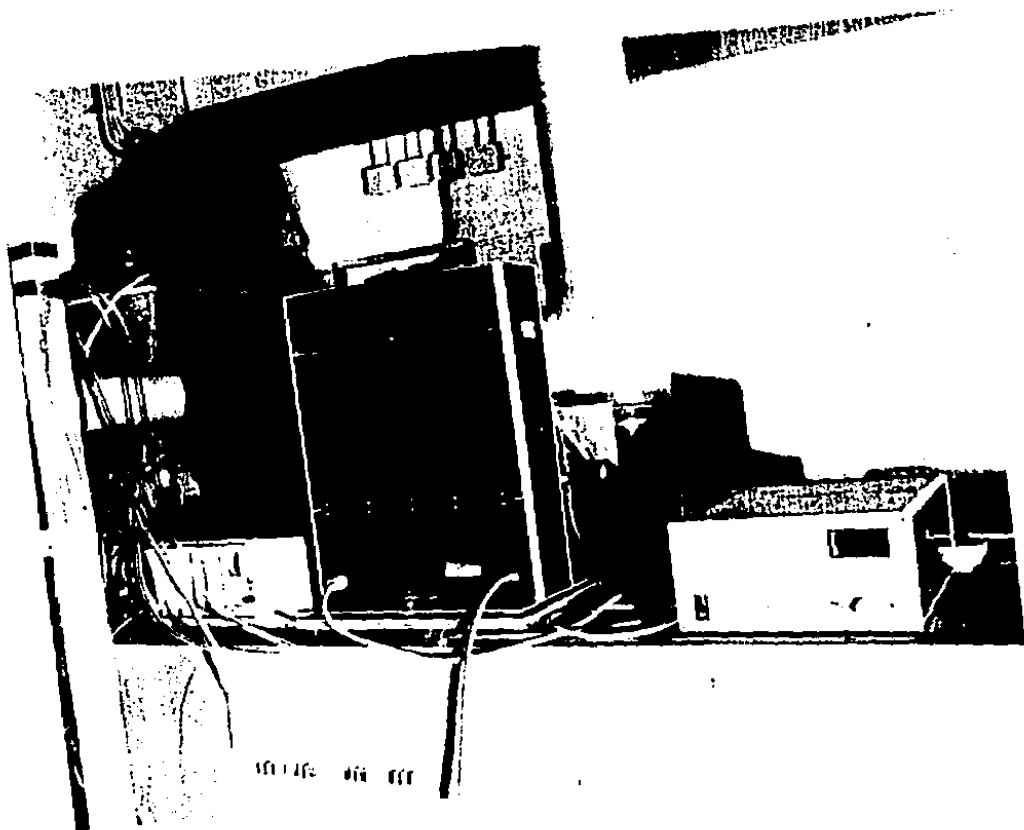
- Amplificador de la señal del fotomultiplicador.
- Fuente de alimentación del fotomultiplicador.
- Controlador electrónico para el movimiento del mecanismo tridireccional del velocímetro.
- Aparato desarrollado por el LSTM-Erlangen para discriminación por amplitud. (Este aparato se coloca antes de la grabadora IWATSU).
- Filtro pasabandas variable.



Unidad de almacenamiento y suministro de partículas.



- A. Intercambiador de calor con sus termopares a la entrada y salida.
- B. Válvula neumática para control del gasto.
- C. Orificio para medición del gasto.
- D. Válvula.



De izquierda a derecha

- Control electrónico de la válvula neumática.
- Dosificador de trazadores marca OEI.
- Control electrónico del dosificador.