



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VELOCÍMETRO PARA
FLUIDOS EMPLEANDO DIODOS LÁSER”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N:

JOSÉ FRANCISCO HERNÁNDEZ VALLE

JORGE LUIS MORALES ROMERO



DIRECTORA DE TESIS: DRA. MARGARITA NAVARRETE MONTESINOS

CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO D.F., MAYO 2003

AGRADECIMIENTOS

La realización del presente trabajo ha sido posible gracias a la participación de varias instituciones y personas, que de manera directa e indirecta contribuyeron a ello. A todas ellas les agradecemos su gentil apoyo.

Agradecemos especialmente a nuestros padres:

Jesús Fernando Morales Cota,
Hilda Romero de Morales, y
Silvia Valle Ramírez.

Y con todo cariño a Alfredo Valle R. y Nélida Córdova M. por el apoyo dedicado todos estos años.

Al Instituto de Ingeniería por la beca otorgada con el Proyecto Interno 2115 “Desarrollo y Construcción de un velocímetro Fotoacústico Empleando Diodos Láser”, a la DGAPA-UNAM con el proyecto IN112Y02.

Al Patronato del Estudiante Sudcaliforniano por la beca de tesis otorgada, así como a la A.E.S.M. por todo el apoyo brindado.

A nuestra directora de tesis, la Dra. Margarita Navarrete Montesinos, por el apoyo que nos brindó para llevar a buen término el presente trabajo.

Asimismo, agradecemos al Dr. Mayo Villagrán Muniz por la ayuda y las facilidades otorgadas en el uso del equipo del Laboratorio de Fotofísica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM.

ÍNDICE

Agradecimientos	I
Resumen	1
Objetivos	2
CAPÍTULO I	3
Generalidades	
I. Introducción a la velocimetría en flujos	3
I.1. Técnicas ópticas y sistemas con láser	4
I.2. Configuraciones ópticas con láser	6
Sistemas de dos haces	
Métodos Doppler en la determinación de velocidades	
Haz de referencia	
Heterodino diferencial	
Heterodino simétrico	
Espectroscopía de ganancia Raman estimulada (SRGS)	
Espectroscopía coherente anti-Stokes Raman (CARS)	
Técnicas holográficas (tridimensionales)	
I.3. Aplicaciones de los velocímetros láser	10
CAPÍTULO II	11
Principios Básicos	
II.1. Fotoacústica	11
II.2. Generación de ondas ultrasónicas por láser	11
II.3. Modelo teórico experimental de Zapka y Tam	13
II.4. Modelos analíticos que predicen el perfil de velocidades en tuberías	15
Flujo entre placas paralelas	
Ecuación de la raíz-enésima para flujo turbulento	
II.5. Modelo numérico para la simulación de flujo turbulento en tuberías	17
CAPÍTULO III	18
Investigación Experimental	
III.1. Equipo	18
III.2. Deflectometría con láser continuo	22
III.3. Metodología	23
III.4. Arreglo experimental	23
III.5. Caracterización de las ondas generadas por el pulso fotoacústico en medio estático	26
III.6. Mediciones del tiempo de arribo y perfil de velocidades	29

CAPÍTULO IV	33
Pruebas y Resultados	
IV.1. Pruebas del aparato experimental	33
IV.2. Resultados	34
IV.3. Comentarios	51
CAPÍTULO V	52
Discusión, conclusiones y trabajo a futuro	
APÉNDICES	
A. Dimensiones de las tuberías utilizadas	55
B. Técnica de la navaja	56
C. Cálculo del diámetro del punto de enfoque y densidad de energía depositada en él	57
D. Tablas de las velocidades de las líneas de flujo obtenidas experimentalmente y su ajuste a modelos analíticos que predicen el perfil de velocidades en tuberías	58
E. Fuente de 5 V DC	64
F. Hojas de especificaciones	65
LISTA DE FIGURAS	70
LISTA DE TABLAS	71
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	72

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VELOCÍMETRO DE FLUIDOS EMPLEANDO DIODOS LÁSER

RESUMEN

Esta tesis tiene como objetivo principal presentar un método alternativo para la medición de perfiles de velocidad en flujos. El sistema de medición está basado en el efecto fotoacústico que se aplica a una línea de corriente, en la cual la absorción del pulso por el medio genera una onda acústica a la velocidad del sonido; la onda acústica se modifica por la velocidad de la línea de corriente, llevando así, la información deseada.

La propagación de la onda modificada se registra mediante su tiempo de arribo a ciertas distancias, aguas arriba y aguas abajo del punto de generación, mediante dos haces continuos que se deflectan cuando interactúan con la onda. Los haces continuos o monitores son emitidos por dos láseres de diodo. Para detectar la deflexión se emplea un fotodetector, el cual registra los cambios de voltaje.

Inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica de las metodologías para la observación del fenómeno fotoacústico, de los fundamentos que rigen a los fluidos y de los modelos usados en ingeniería hidráulica; luego se efectuaron pruebas sistemáticas para evaluar la técnica propuesta, permitiendo conocer y, posteriormente, controlar los parámetros que afectan las mediciones de los tiempos de arribo (la energía mínima depositada en el medio, la lente de enfoque para concentrar la energía, la longitud de onda del láser, las distancias mínimas entre el punto de generación de la señal fotoacústica y las líneas de monitoreo, entre otras). Asimismo, se establecieron las principales condicionantes del método, como son: la temperatura, control del voltaje de salida del fotodetector y las distancias entre el punto de generación de la onda acústica y las líneas de monitoreo.

Experimentalmente se realizaron mediciones del tiempo de arribo de la onda modificada a distancias conocidas. A partir de estos datos y aplicando el modelo de onda cilíndrica desarrollado por Vlasses y con el modelo teórico-experimental de W. Zapka y A.C. Tam, se calculó el valor experimental de la velocidad de la línea de corriente. Este procedimiento se aplicó en varios puntos a lo largo de la sección transversal de la tubería, generando así el perfil de velocidades

Los valores de la velocidad de las líneas de corriente experimentales se ajustaron a dos modelos analíticos empleados en flujos turbulentos: a) el de flujo entre placas paralelas y, b) el de raíz-n, generándose los perfiles de velocidad analíticos a partir de valores experimentales. De estos modelos se recuperan datos como: la velocidad media y el índice de turbulencia.

Los experimentos se llevaron a cabo en una tubería acrílica con ajuste vertical. La recirculación del agua se realizó con una bomba de $\frac{3}{4}$ de H.P.

El dispositivo experimental mide velocidades que van desde metros por segundo, hasta velocidades inferiores a la velocidad del sonido del medio donde se propaga.

José Francisco Hernández Valle
Jorge Luis Morales Romero
Facultad de Ingeniería, UNAM
(2003)

OBJETIVOS GENERALES

Basándonos en los trabajos preliminares de W. Zapka y A.C. Tam [1,2], establecemos los objetivos del presente trabajo:

1. Implementación y desarrollo de un velocímetro fotoacústico experimental.
2. Determinación de los parámetros necesarios para producir una onda estable como sonda para determinar la velocidad de las líneas de flujo, así como las distancias mínimas requeridas para obtener la mejor relación señal/ruido.
3. Determinación del intervalo de velocidades que es posible medir con el dispositivo implementado.
4. Obtención del porcentaje de error experimental que se obtiene al hacer mediciones con el velocímetro fotoacústico.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Conocer el equipo en cuanto a su manejo y características de desempeño.
2. Determinación de temperatura, energía y distancia necesaria para producir ondas ultrasónicas.
3. Ajustes con distintos modelos matemáticos.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

I. INTRODUCCIÓN A LA VELOCIMETRÍA EN FLUIDOS

En los problemas de dinámica de fluidos, la velocidad del flujo es el parámetro más importante y complejo a determinar debido a que la solución de las ecuaciones de movimiento implica dificultades. Por ello, los estudiosos de dicha rama han desarrollado técnicas experimentales, así como también instrumentos, para la medición de este parámetro.

Así, por ejemplo, se desarrolló un instrumento, que se conoce como tubo de Pitot, para determinar la velocidad del flujo. Dicho aparato se caracteriza por su simpleza y bajo costo. Lamentablemente, para el estudio de flujos turbulentos es poco usado porque su respuesta en frecuencia y resolución están lejos de poder resolver la estructura de un vórtice a escala pequeña. Para solucionar este problema, se desarrolló el Anemómetro de Hilo Caliente (AHC) [3], que fue por muchos años el aparato estándar para el estudio de la turbulencia. Las primeras pruebas con el AHC mostraron que no podían ser realizadas en líquidos o en ambientes más hostiles que los existentes en un laboratorio.

Debido a estas dificultades, se emplearon frecuentemente medidores con hélice miniatura, especialmente en los laboratorios de hidráulica, donde la escala del aparato tiende a ser grande. Con estos medidores, la velocidad se obtenía registrando las revoluciones de la hélice, normalmente utilizando un mecanismo de conteo electrónico. A pesar de que la hélice medía entre 4 y 6 mm de diámetro, la resolución espacial no fue suficiente para medir las fluctuaciones de la turbulencia. Además, la respuesta en frecuencia tendía a ser pobre debido en parte, a los efectos inerciales y por otra, a que la velocidad se obtenía con un tiempo promedio. Así, el límite de la respuesta en frecuencia que era típicamente de 10 Hz, nunca se alcanzaría con el AHC. Otro problema que presenta es que cuando el instrumento es introducido al sistema el flujo se perturba, lo cual provoca datos falsos. Este es un error común en todos los velocímetros convencionales y puede conducir a errores significativos sobre todo en experimentos a pequeña escala. En este sentido, otro error fundamental que presenta el AHC es la calibración de los hilos de prueba, que se calibran con un patrón estandarizado para determinar las características de salida del voltaje como función de la velocidad del flujo. En resumen, los AHC pueden utilizarse en condiciones de flujo estacionario o en flujos que tengan una velocidad estacionaria media superpuesta por pequeñas perturbaciones, cuyos valores RMS no excedan el 10 % de la media.

Así, en 1971 Bradshaw diseñó un instrumento que trataba de superar al AHC, para medir la velocidad de flujo en condiciones de alta turbulencia; lo llamó Hilo Caliente Pulsado (HCP) [3]. En esencia, éste era un tubo que utilizaba tres hilos delgados, separados cierta distancia entre ellos: los dos hilos en los extremos, los receptores, eran paralelos entre sí y perpendiculares al central, que era el transmisor. El hilo transmisor era calentado periódicamente con una corriente pulsada y los hilos receptores que operaban de la misma manera que en el AHC, eran también sensibles a cambios pequeños de temperatura. Así, el tiempo que pasa entre cada pulso de calor entre el hilo transmisor y el receptor era registrado electrónicamente y convertido a velocidad multiplicando el recíproco del tiempo que pasa entre cada pulso por la distancia entre los hilos. Cabe señalar que la técnica de HCP proporciona una medida directa de la velocidad y que, además, el problema fundamental de los AHC, la calibración, era superado debido a que en este caso es independiente de las

propiedades de los fluidos. De hecho, en la práctica se ha demostrado que esta técnica puede ser utilizada con éxito para medir velocidades con gran turbulencia y flujo inverso. Sin embargo, existen también muchas limitaciones en su aplicación. Primero, su resolución espacial tiende a ser más pobre que en los AHC y por lo tanto no supera el problema de interferencia de sonda con los patrones de flujo. Segundo y más importante, su respuesta en frecuencia es muy pobre. Por lo que esto imposibilita el registro de señales continuas de velocidad para su uso en el análisis espectral y en la correlación.

I.1 TÉCNICAS ÓPTICAS Y SISTEMAS CON LÁSER

Técnicas ópticas

La visualización del flujo por medio de la fotografía, o simplemente por observación, introduciendo partículas o colorantes en el flujo, fueron unas de las primeras técnicas de medición. El problema en el tratamiento de los fluidos recae en el análisis cuantitativo de los datos, ya que éste implica el rastreo de miles de partículas en movimiento a través del fluido, lo cual es difícil incluso con la ayuda de una computadora. Algunos de los resultados más útiles han sido obtenidos filmando algunas burbujas de hidrógeno en agua; esta técnica consiste en liberar cadenas de burbujas desde posiciones conocidas con exactitud a intervalos de tiempo que son procesados posteriormente con una computadora, lo cual simplifica el trabajo. A pesar de esto, no se evita el problema de tener que analizar un campo tridimensional con una serie de fotografías en dos dimensiones. Se realizaron varios intentos con el análisis fotográfico estereoscópico para reconstruir los patrones de flujo tridimensionales [4], pero esto aumentaba el número de datos a ser procesados.

La atracción más obvia de las técnicas ópticas para medir el flujo es que no lo perturba. Sin embargo, los métodos fotográficos descritos tienden a ser más útiles en estructuras grandes con turbulencia. Con el fin de observar el flujo turbulento se necesitan rastrear los movimientos de partículas extremadamente pequeñas que sigan fielmente las fluctuaciones de alta frecuencia. Fage y Townend [5] desarrollaron un sistema con un ultra-microscopio para la observación de estos movimientos. De hecho, éste empleaba algunas de las técnicas utilizadas en anemómetros láser modernos. El principio del ultra-microscopio dependía del hecho de que las partículas microscópicas, presentadas naturalmente en casi todos los fluidos, se volvían visibles cuando eran iluminadas por un haz intenso y eran vistas contra un fondo negro. Empleando un objetivo que podía rotar, Fage y Townend fueron capaces de observar los movimientos microscópicos desde un marco de referencia moviéndose con la velocidad media del fluido. Los anemómetros láser modernos obtienen sus señales detectando la luz dispersada por estas partículas microscópicas.

Los sistemas ópticos de Schlieren [3] han sido, durante mucho tiempo, un equipo básico en los laboratorios de aerodinámica. A diferencia de los métodos que están basados en los gradientes del índice de refracción en la región del flujo para deflectar el haz y causar una variación de intensidad sobre el plano de la placa fotográfica, en el sistema óptico de Schlieren se esparce la luz incidente de partículas microscópicas. Una característica común de estas tres técnicas de visualización de flujo es que dan una visión integral a través de la región de flujo, y no de un solo punto. Esto hace del análisis cuantitativo de los resultados una tarea extremadamente difícil. La información puntual sobre el índice de refracción se obtiene si se utilizan dos haces separados (usualmente haces láser). Ambos haces pasan a través de la región del fluido y

después utilizando la técnica de la navaja¹, llegan a los fotodetectores. El gradiente del índice de refracción causa una deflexión en los haces variando la señal que reciben los fotodetectores. Si, por ejemplo, los haces son perpendiculares entre ellos y se intersectan en un punto del flujo, puede extraerse cierta información sobre las fluctuaciones del índice de refracción en ese punto haciendo la correlación de las dos señales del fotodetector.

Sistemas con láser

Desde la década del sesenta, la introducción del láser ha hecho posible el desarrollo de sistemas modernos de medición óptica puntual de la velocidad. Dichos sistemas se han convertido en una de las más poderosas herramientas en la dinámica experimental de fluidos; ya que permiten realizar mediciones de alta localización, explorando zonas inaccesibles para otras técnicas, cubrir intervalos de velocidades muy grandes y lo principal, son no invasivos de manera que operan sin distorsionar el sistema en estudio. Los métodos ópticos basados en el uso de láseres permiten medir velocidades desde pocos milímetros por segundo, como por ejemplo las encontradas en la circulación de la sangre, hasta mediciones supersónicas del orden de miles de metros por segundo, encontradas en túneles aerodinámicos.

Yeh y Cummins [6], fueron los primeros en demostrar la factibilidad de construir el primer velocímetro láser por efecto Doppler (LDV) en 1964, y determinaron el perfil de velocidades para un flujo laminar en una tubería circular. El método consistía en mezclar coherentemente (heterodinar) la luz dispersada por pequeñas partículas agregadas al fluido con el haz de referencia tomado del mismo láser que iluminaba las partículas.

Otros investigadores, utilizaron el método de correlación cruzada, el cual es muy similar al concepto del anemómetro de HCP ya que éste también mide el tiempo de tránsito de las partículas entre dos haces que están enfocados al flujo.

Un desarrollo importante en la anemometría láser fue la introducción de las técnicas de conteo de fotones, utilizada en varias ramas de la física, y que recientemente se aplicó en las mediciones de flujo. En un experimento de conteo de fotones se busca detectar digitalmente los tiempos de llegada de los fotones en un haz; la ventaja de este procedimiento es la alta sensibilidad sobre los métodos análogos conocidos. Con un detector de conteo de fotones es posible trabajar con intensidades bajas de radiación dispersada, lo cual abre distintos campos en donde el láser podría ser empleado, por ejemplo, en la dinámica de fluidos biológicos en donde muchas veces es intolerable la utilización de láseres de alta potencia [3].

Dado que los anemómetros láser utilizan la dispersión de luz sobre partículas en el fluido, es pertinente conocer algunas teorías sobre este tema. Las dos teorías más útiles sobre la dispersión [7] se deben a Rayleigh y Mie. Sin embargo, la teoría de Rayleigh únicamente aplica cuando el diámetro de dispersión es menor a un décimo de la longitud de onda de la radiación incidente, por ejemplo, en diámetros menores a $0.06 \mu\text{m}$ de radiación He-Ne. En aplicaciones reales siempre existirán partículas en el fluido, tanto naturales como introducidas, del orden de 1 o $2 \mu\text{m}$ de tamaño. La dispersión en estas partículas dominará completamente a la dispersión molecular y a la dispersión de Rayleigh en partículas más pequeñas. Así que, generalmente, se asume que la teoría de Mie se utiliza para los cálculos de la dispersión en la anemometría láser, en lugar de la teoría de Rayleigh, ya que en ésta el diámetro de dispersión puede ser mayor que la longitud de onda.

¹ Ver **Apéndice B**

I.2 CONFIGURACIONES ÓPTICAS CON LÁSER

En este apartado, se describen algunas de las configuraciones ópticas más usadas para la medición de la velocidad en fluidos. La mayoría de estas configuraciones funcionan bajo el mismo principio de operación, el efecto Doppler; utilizan un haz láser que es enfocado en un punto de observación en el flujo y la luz es dispersada por pequeñas partículas, las cuales pueden ser propias o introducidas en el flujo. Cabe señalar que éstas deben ser de un tamaño microscópico y tener densidades cercanas a la del fluido circulante, de otra forma éstas no seguirán de manera adecuada el flujo y las características exactas de éste no serán determinadas.

Sistemas de dos haces

Los primeros intentos en el empleo de las técnicas ópticas en la medición del flujo fueron dirigidas a la medición de tiempos de tránsito de centros de dispersión que cruzan dos haces enfocados en el flujo. Uno de estos sistemas fue descrito por Thompson (1968) [8]. Los principales componentes del sistema se muestran en la figura 1.1.

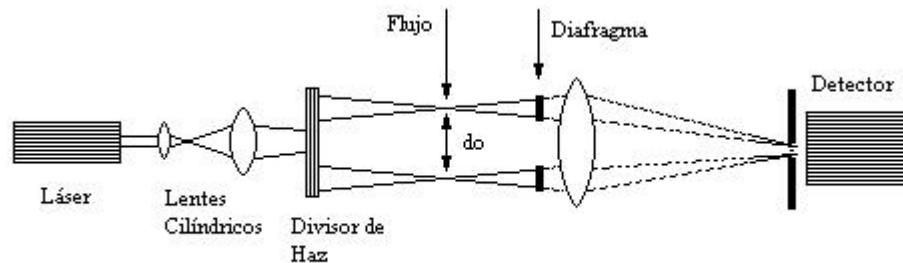


Fig. 1.1. Arreglo para el sistema de dos haces [3].

En el sistema descrito por Thompson, los tiempos de tránsito son registrados para cada partícula con un osciloscopio y son obtenidos de observar la posición de un segundo pulso en la pantalla del osciloscopio, lo cual se aprecia en la figura 1.2.

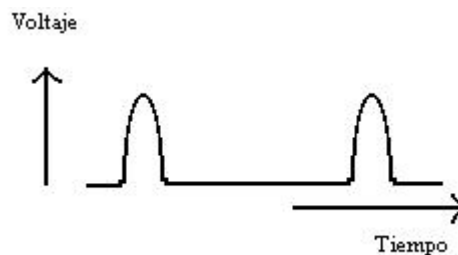


Fig. 1.2. Pulsos producidos por una sola partícula [3].

En un sistema óptico, si la línea que pasa el centro de los puntos focales está en la dirección del flujo, entonces para un tiempo de tránsito (ϵ) y una distancia entre haces (d_0), la velocidad es simplemente $U = d_0/\epsilon$. Para un flujo turbulento es posible teóricamente obtener la densidad de probabilidad completa registrando las velocidades instantáneas de un gran número de

partículas. Este procedimiento sería tedioso porque para obtener una media estadística buena, se tendrían que realizar muchos experimentos.

En los sistemas de dos haces la necesidad de registrar la velocidad de cada partícula se elimina si se utiliza la correlación para el análisis de la señal proveniente del detector. En general, es preferible tener dos detectores separados, uno para cada haz y hacer mejor la correlación cruzada de las salidas que la autocorrelación de la salida de uno sólo de los detectores. La precisión de este método está limitada por el tamaño finito de los puntos de difracción del haz.

Métodos Doppler en la determinación de velocidades

El fenómeno de efecto Doppler permite relacionar la frecuencia de la luz con la velocidad relativa entre el observador y la fuente, en donde la modificación de la frecuencia luminosa se advierte como un cambio en el color de la luz. Si se analiza el espectro de un cuerpo que se aleja del observador las frecuencias disminuyen y las líneas espectrales que éste emite se corren hacia el rojo, si el cuerpo se acerca al observador el corrimiento es hacia el azul; estos desplazamientos son fácilmente perceptibles cuando la fuente luminosa se mueve con una velocidad comparable con la velocidad de la luz [9].

Luego de que se determinó que era factible medir velocidades por efecto Doppler utilizando láseres, se idearon distintas configuraciones prácticas para materializar la idea de la medición de la velocidad. Los sistemas básicos son tres:

- a) Haz de referencia,
- b) Heterodino diferencial, y
- c) Heterodino simétrico.

En todos estos sistemas los componentes básicos son los mismos: láser, divisor de haz, lentes de enfoque y de recolección, obturador, fotodetector y sistema de procesamiento de señales.

Haz de referencia [3]

En este arreglo (figura 1.3) uno de los haces que se intersectan incide directamente sobre el fotodetector. En este caso, se requiere una concentración alta de partículas. Este método se deriva del trabajo de Yeh y Cummins quienes tomaban la referencia directamente desde el láser.

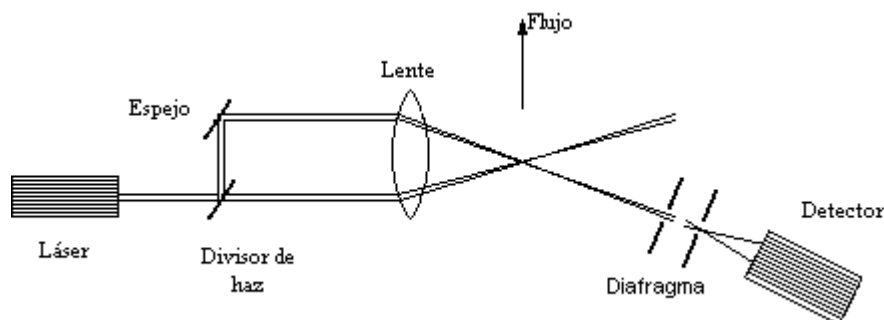


Fig. 1.3. Arreglo para el sistema de haz de referencia [3].

Heterodino diferencial [3]

A este método también se le conoce como método del doble haz o método de las franjas (figura 1.4). Aquí, dos haces de igual intensidad se intersectan y se registra la luz dispersada. Es posible trabajar con baja concentración de partículas. Su ventaja principal radica en la gran flexibilidad, ya que el volumen de medición puede regularse para que esté adaptado al tamaño de las partículas y al gradiente de velocidades.

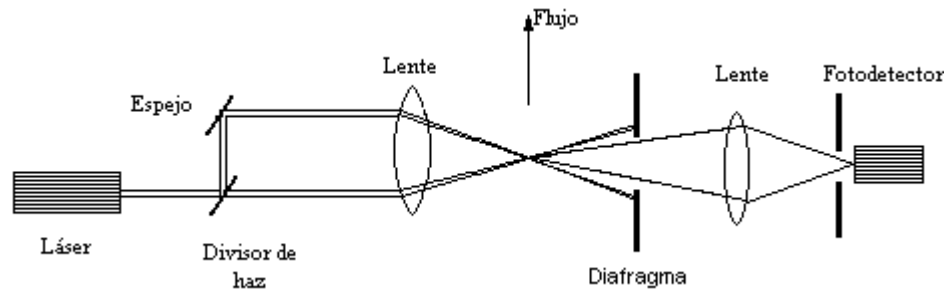


Fig. 1.4. Arreglo para el sistema heterodino diferencial [3].

Heterodino simétrico [3]

En este caso, se emplea un solo haz cuya luz es dispersada por las partículas (figura 1.5). En la recolección se intercepta el haz directo, registrando la luz dispersada. Este arreglo puede funcionar con una concentración baja de partículas. La óptica requerida es simple, la alineación es relativamente fácil y el ensanchamiento en el espectro de la señal Doppler, que surge del hecho de tener que utilizar aperturas necesariamente finitas, es relativamente menor que en el caso de doble haz.

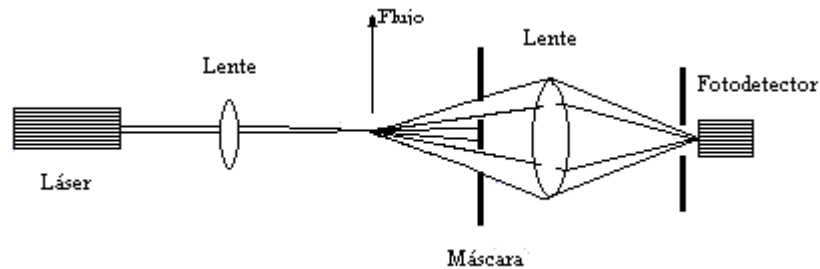


Fig. 1.5. Arreglo para el sistema heterodino simétrico [3].

Espectroscopía de ganancia Raman estimulada (SRGS)

Este método utiliza el corrimiento Doppler de la frecuencia Stokes de espectroscopía de ganancia Raman estimulada. La técnica consiste en enfocar dos haces, uno de bombeo y otro que sirve como monitor y observar el corrimiento entre ambos haces para estimar la velocidad del flujo [10]; éstos son enfocados en direcciones encontradas para obtener el máximo corrimiento Doppler para un fluido. La figura 1.6 muestra el arreglo experimental típico para SRGS, donde se observa que la primera señal se obtiene utilizando el inyector que está en dirección del flujo y la segunda utilizando el inyector que se encuentra en la dirección opuesta. Las dos señales son comparadas y con base en el corrimiento observado se determina la

velocidad del flujo. Este método tiene una resolución típica de 30 m/s, debido a una relación señal-ruido pobre del espectro del SRGS.

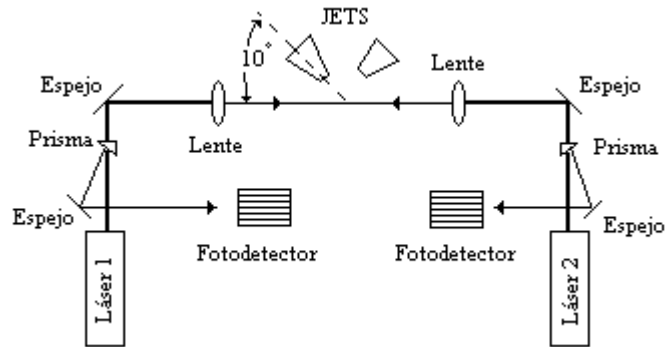


Fig. 1.6. Arreglo experimental para SRGS.

Espectroscopía coherente anti-Stokes Raman (CARS) [11]

Recientemente la espectroscopía de ganancia Raman ha sido sugerida como un método efectivo para mediciones de la velocidad en fluidos, con la condición de que ésta sea lo suficientemente grande para que la detección del corrimiento de la frecuencia Stokes sea posible. Además, este método es utilizado en la determinación de temperaturas, de concentración de partículas en fluidos, en sistemas de combustión y en descargas de plasmas. Para la determinación de la velocidad, el arreglo experimental (figura 1.7) cuenta con dos haces láser para generar el corrimiento, dichos haces son enfocados por medio de lentes en el flujo que producen dos toberas o boquillas: una que se encuentra perpendicular a los haces (referencia); y, otra que tiene un ángulo de 45° con respecto a los haces y que será la que produzca el flujo que se va a medir. Estos haces son registrados en una computadora, en la que posteriormente se hace el análisis de las dos señales obtenidas: la de referencia y la muestra, obteniendo su correspondiente espectro y observando el corrimiento en frecuencia que existe entre las dos señales.

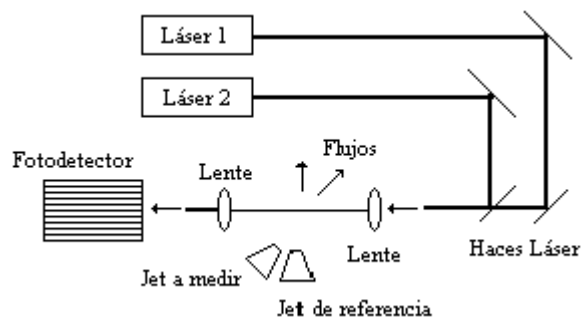


Fig. 1.7. Arreglo experimental para CARS.

Técnicas holográficas (tridimensionales)

Las técnicas holográficas han sido utilizadas desde la década de los sesentas, especialmente en el estudio de partículas y, recientemente, en velocimetría de fluidos debido a su capacidad de medir de manera tridimensional, permitiendo así capturar el patrón del flujo casi en tiempo

real. La razón por la cual este método es menos utilizado que los descritos anteriormente es, probablemente, porque presenta distorsión en la imagen y cierta aberración causada por las condiciones de frontera del flujo, especialmente en tuberías cilíndricas.

I.3 APLICACIONES DE LOS VELOCÍMETROS LÁSER

Las mediciones que exigen la instrumentación más simple son las mediciones unidimensionales en sólidos y las de fluidos en condiciones de flujo laminar. El perfil de velocidades en un tubo se ha medido y comparado satisfactoriamente con la solución exacta de la ecuación de Navier-Stokes con una precisión de 0.2 % [9]. Controlando el volumen de medición hasta la zona de 10mm, utilizando microscopios invertidos, se han medido velocidades de hasta 1 mm/s en capilares de 200 μm de diámetro. Estos trabajos tienen como objetivo llegar a realizar mediciones en vivo del flujo sanguíneo.

La velocidad de respuesta de los velocímetros láser ha permitido realizar mediciones en fluidos con turbulencias. Dichas mediciones fueron realizadas en ductos, conjuntos pistón-cilindro, etc.

La dificultad más importante que se encuentra en estos sistemas, proviene de la necesidad de contar con partículas suficientemente pequeñas que puedan seguir el flujo sin distorsión y aún dispersen la cantidad de luz requerida. Generalmente se utilizan en este campo láseres de argón con hasta 2 W de potencia y procesadores que operan a altas frecuencias, con una cantidad mínima de luz.

El estudio de las turbomáquinas constituye otro campo donde se han empleado satisfactoriamente los velocímetros láser. Se han realizado mediciones en compresores, en motores de aviación, en rotores de helicópteros y túneles de viento. En algunos casos los resultados se han comparado con los obtenidos mediante anemómetros de hilo caliente y tubos de Pitot, brindando valores para las velocidades medias dentro del 2 al 3% unas de otras. Esto justifica el uso de los velocímetros láser donde los métodos convencionales no pueden utilizarse.

Otro campo donde la aplicación de los velocímetros láser es cada vez más frecuente es en el estudio de los sistemas de combustión y en los dispositivos de procesamiento térmico a temperaturas elevadas.

En los sistemas que operan procesos de mezclado, la precisión en la medición de la velocidad es necesaria para producir las densidades deseadas. Estos sistemas de medición, también se están utilizando para controlar la longitud de productos siderúrgicos elaborados en continuo.

Como puede verse, el campo de acción de los velocímetros láser es bastante amplio debido a todas las ventajas que representan sobre otros tipos de velocímetros. De esta manera se demuestra la validez de realizar un nuevo velocímetro económicamente más accesible y de fácil manejo, ya que el mercado tiene una notable necesidad de ellos.

CAPÍTULO II

PRINCIPIOS BÁSICOS

II.1 FOTOACÚSTICA

El término fotoacústica (PA) u optoacústica (OA) frecuentemente se refiere a la generación de ondas acústicas por radiación óptica modulada. Ambos términos son de uso común y tienen el mismo significado. En su sentido más amplio, fotoacústica puede significar la generación de ondas acústicas u otros efectos termoelásticos por cualquier tipo de radiación energética, incluyendo radiación electromagnética desde radiofrecuencia hasta rayos X, electrones, protones, iones y otras partículas.

El efecto fotoacústico fue descubierto por A.G. Bell (1880), quien observó que se producía sonido audible cuando hacía incidir luz solar modulada con un disco perforado en materiales ópticamente absorbentes. El tema comenzó a recobrar interés hasta mucho tiempo después con los trabajos de Kruezer (1971), quien reportó que los constituyentes de un gas podían ser detectados con la generación PA inducida por láser. De esta manera, muchos trabajos tanto teóricos como experimentales, han sido reportados en la literatura para demostrar no sólo las aplicaciones espectroscópicas, sino también muchas otras en diferentes campos del conocimiento de la física, la química, la ingeniería y la medicina. Éste efecto puede ser estudiado y utilizado de dos formas: (a) utilizando un haz láser continuo con un obturador a una frecuencia típica de 10-1000 Hz; y (b) con un láser pulsado (con una duración de pulso menor a los microsegundos) [13].

Existen cuatro clasificaciones generales para las aplicaciones de los métodos fotoacústicos:

- 1) Espectroscopía PA: En esta clase de aplicación, se mide la amplitud de la señal PA en el intervalo de longitud de onda de la excitación óptica, obteniéndose un espectro PA.
- 2) Monitoreo PA de procesos de desexcitación: Después de la excitación óptica, cuatro procesos de decaimiento son posibles: luminiscencia, fotoquímica, fotoelectricidad y calor, que pueden ser generados directamente o a través de los procesos de transferencia de energía.
- 3) Inspección PA de las propiedades termoelásticas y físicas de los materiales: Determinación de las constantes elásticas, temperatura, velocidad de flujo, calor específico, difusividad térmica, etcétera.
- 4) Generación PA de movimientos mecánicos: Esta es un área de aplicación que todavía no está muy desarrollada. Los efectos PA pueden producir el movimiento de gotas de agua o en vibraciones estructurales.

II.2 GENERACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS POR LÁSER

La generación de ondas ultrasónicas por pulsos láser puede ser explicada como sigue: cuando un pulso de luz láser se hace incidir sobre un medio absorbente, una fracción de éste se convierte en calor causando una energía térmica repentina. La reacción del medio para equilibrarla es mediante dos mecanismos: la difusión del calor y la expansión térmica volumétrica, ambos procesos se inician, pero la expansión térmica necesita tiempo para

realizarse y en los primeros instantes la difusión térmica es más rápida generándose un desequilibrio de energía entre ambos procesos, la cual es equilibrada de acuerdo con la segunda ley de Newton como aceleraciones (ondas ultrasónicas). Una vez que ha concluido la expansión térmica ya no hay emisión de ondas ultrasónicas [14].

De manera similar este fenómeno se produce en un líquido [15] y puede ser explicado de la siguiente manera. Sea un volumen cilíndrico de líquido de longitud ℓ y de radio r iluminado por un pulso láser de energía E , con duración τ y asumiendo que existe una conversión total de la energía de luz absorbida Q (coeficiente de absorción $\alpha \ll 1/\ell$) en energía térmica (E_t), tenemos que después de que el pulso ha sido aplicado:

$$Q = E_t \quad (1)$$

Y también

$$Q = E\alpha \cdot \ell \quad (2)$$

Ahora bien, asumiendo que se presenta una expansión tanto isobárica como adiabática del fluido iluminado, se tiene que la energía térmica puede expresarse de la siguiente manera:

$$E_t = C_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad (3)$$

Donde:

C_p es el calor específico a presión constante.

ρ es la densidad.

V es el volumen iluminado, igual a $\pi \cdot r^2 \ell$.

ΔT es el incremento de temperatura ocurrido en un periodo τ .

Conociendo que el incremento de temperatura produce un cambio en el valor del radio del cilindro (denotado como a), se tiene que justo después de aplicarle el pulso láser r cambia a $(r+a)$, tal como es determinado por el coeficiente de expansión térmica (β) en la siguiente ecuación:

$$\pi(r+a)^2 \ell - \pi \cdot r^2 \cdot \ell = \beta \cdot V \cdot \Delta T \quad (4)$$

Si consideramos que $a \ll r$, entonces la ecuación anterior se reduce a:

$$2\pi \cdot r \cdot a \cdot \ell = \beta \cdot V \cdot \Delta T \quad (5)$$

De esta manera, combinando las ecuaciones de la (1) a la (5), llegamos a otra ecuación que es la base de la espectroscopía fotoacústica pulsada:

$$\frac{a}{E} = \frac{\beta}{2\pi \cdot r \cdot C_p \cdot \rho} \cdot \alpha \quad (6)$$

Donde α es el coeficiente de absorción óptica.

Es sabido que la energía acústica (E_{ac}) es proporcional al cuadrado de la amplitud del desplazamiento (que en este caso es a), y está dada por:

$$E_{ac} = \gamma_{ac} (\Delta T)^2 \quad (7)$$

Donde:

γ_{ac} = una constante que depende de la geometría, el coeficiente de expansión térmica y el volumen del líquido.

Entonces, para que la ecuación de la conservación de energía (ecuación 1) esté completa debemos agregar esta última, así, se tiene que:

$$Q = C_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T + \gamma_{ac} (\Delta T)^2 \quad (8)$$

Por otro lado, experimentalmente es posible calcular el valor de la amplitud (A) de cualquier transductor y considerarla como:

$$A = const (c\rho\alpha) \quad (9)$$

De aquí que la señal optoacústica experimental normalizada sea:

$$S = \frac{A}{E} \quad (10)$$

Y por último, combinando las ecuaciones (6), (9) y (10), se puede concluir que la señal optoacústica es proporcional al coeficiente de absorción del medio:

$$S = K\alpha \quad (11)$$

Donde K es el factor de eficiencia de la detección fotoacústica y se toma como constante cuando se tiene una geometría fija y un líquido no mezclado. Para líquidos mezclados, tomando también de las ecuaciones (6), (9) y (10), se tiene:

$$K = \left[\frac{const}{2\pi \cdot r} \right] \left[\frac{\beta \cdot c}{C_p} \right] \quad (12)$$

De la ecuación (12), resulta importante mencionar que β se ve afectada con la temperatura, lo que provoca que las pruebas no den resultados reproducibles si no se tiene un control adecuado sobre la temperatura; ya que cambia la velocidad de propagación de la onda al cambiar también la temperatura del medio en el que se propaga.

II.3 MODELO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE ZAPKA Y TAM

El principio básico de operación de este método consiste en lo siguiente: al enfocar un pulso láser sobre la línea de corriente del flujo, se produce una onda de choque en la posición "0", en la cual la velocidad de propagación $U(y)$ en el fluido estático es dependiente del tiempo y es más rápida que la velocidad del sonido del medio (C_0), esto provoca una deflexión en un láser continuo que es usado como punto de prueba. La figura 2.1 presenta el arreglo experimental de éste método.

Considerando las propagaciones acústicas aguas abajo y aguas arriba:

$$R(t_1) + U(y) \cdot t_1 = l_1 \quad (13)$$

$$R(t_2) + U(y) \cdot t_2 = l_2 \quad (14)$$

Donde:

$R(t) = \int_0^t c(t') dt'$ es la distancia que recorre el pulso acústico en un medio estático.

l_1 y l_2 son las distancias, a favor y en contra del flujo respectivamente, desde “0” hasta los haces que sirven de prueba para determinar los tiempos de arribo t_1 y t_2 .

$U(y)$ es la velocidad del flujo.

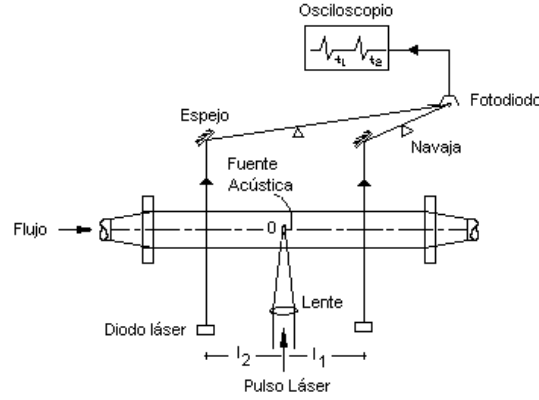


Fig. 2.1. Arreglo experimental para el cálculo de la velocidad con el modelo de Zapka y Tam.

De las ecuaciones (12) y (13), se tiene que la velocidad del flujo es:

$$U(y) = [R(t_2) - R(t_1) + l_1 - l_2] / (t_1 + t_2) \quad (15)$$

Recordando que la ecuación de una onda de choque cilíndrica, dada por Vlasses y Jones [14], es:

$$R(t) = C_0 \cdot t [1 + R_0 / (C_0 \cdot t)]^{1/2} \quad (16)$$

donde R_0 es una escala de longitud, la cual depende simplemente de tres cantidades, a saber: C_0 , la densidad del fluido y la energía depositada por unidad de longitud en la línea acústica de la fuente.

De esta manera, sustituyendo la ecuación (16) en (15) obtenemos $U(y)$, pero este resultado no es útil si se desconoce el valor de R_0 , por lo que se realiza una expansión binomial en la ecuación (16) y este resultado se sustituye en la ecuación (15), quedando:

$$U(y) = \frac{C_0(t_2 - t_1)}{t_1 + t_2} (1 + \delta) + \frac{(l_1 - l_2)}{t_1 + t_2} \quad (17)$$

Esta ecuación fue publicada por Zapka y Tam [1], y puede notarse que los efectos de la onda de choque son tomados en cuenta por medio del parámetro δ , el cual se define como $\delta = R_0^2 / (8C_0^2 t_1 \cdot t_2) \approx R_0 / 8l_1 l_2$, y es conocido como “Factor de Corrección por Onda de Choque”. El factor de corrección δ es despreciable cuando se realizan pruebas a distancias grandes (> 10 cm) debido a que el comportamiento de la onda de choque cilíndrica se vuelve muy lineal, como se demuestra posteriormente. Es por esto que no es estrictamente necesario conocer el valor de R_0 para poder obtener el valor de la velocidad, sin embargo para fines de comprobación de las ecuaciones (16) y (17) es necesario conocer este valor.

Cabe señalar que este método sólo es aplicable para velocidades puntuales, por lo que fue necesario expandirlo para poder obtener un perfil de velocidades.

II.4 MODELOS ANALÍTICOS QUE PREDICEN EL PERFIL DE VELOCIDADES EN TUBERÍAS

Se consideran dos modelos analíticos para obtener la ecuación del perfil de velocidades a partir de datos experimentales: modelo de flujo entre placas paralelas y modelo de la raíz-enésima para flujo turbulento.

Flujo entre placas paralelas

El siguiente modelo analítico sirve para calcular el perfil de velocidades a partir de valores experimentales que se obtienen de un flujo entre dos placas paralelas de longitud infinita. El desarrollo de este modelo se aplica en fluidos con flujo desarrollado, estable e incompresible, como se muestra en la figura 2.1, en donde el fluido se mueve con una velocidad U y se tiene un volumen elemental con ancho unitario en la dirección z [16]. La ecuación del modelo simplificado es:

$$U(y) = 1/2\mu \, dp/dx (y^2 - ay) \quad (18)$$

y si $dp/dx = -\Delta p/L$ (gradiente de presión) $= (12\mu U_m)/a^2$

$$U(y) = (1/2\mu) \cdot (12\mu U_m)/a^2 \cdot (y^2 - ay) \quad (19)$$

Donde:

U_m es la velocidad media del fluido.

a es la distancia de separación entre las placas paralelas.

μ es la viscosidad del fluido.

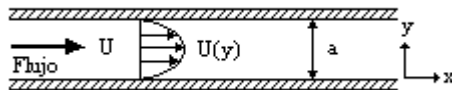


Fig. 2.2. Flujo entre placas paralelas.

Ecuación de la raíz-enésima para flujo turbulento

Este modelo analítico es de los más utilizados en mecánica de fluidos dada su simplicidad y es aplicable en flujos turbulentos desarrollados, de fluidos compresibles e incompresibles, para encontrar el perfil de velocidades en tuberías totalmente llenas (figura 2.2).

Ecuación para la obtención del perfil de velocidades en tuberías [17]:

$$U(y) = U_m (y/R_o)^{1/n} \quad (20)$$

Donde:

U_m es la velocidad media del fluido.

R_o es la distancia de la pared de la tubería al centro de ésta.

n es el índice de turbulencia.

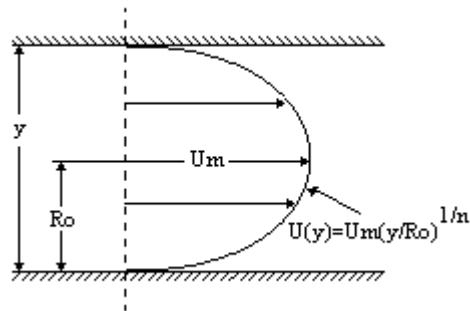


Fig. 2.3. Perfil de velocidades aplicando la ecuación de la raíz enésima.

II.6 MODELO NUMÉRICO PARA LA SIMULACIÓN DE FLUJO TURBULENTO EN TUBERÍAS

Además de los modelos analíticos para predecir perfiles de velocidad en tuberías, existen otros métodos que son numéricos, sin embargo estos métodos requieren de procedimientos numéricos muy complejos y por esta razón quedan fuera del alcance de esta tesis.

Estos métodos se aplican en sistemas en donde se tienen diferentes condiciones de frontera como por ejemplo un cambio abrupto de la sección transversal (ver figura 2.3 (a)), además de que parten de considerar que se tiene un flujo con perfil de velocidad parabólico en el inicio, totalmente desarrollado y con un número de Reynolds bajo. La figura 2.3 (b) muestra un ejemplo de un perfil de velocidades que se obtendría para una tubería de sección cuadrada [18]:

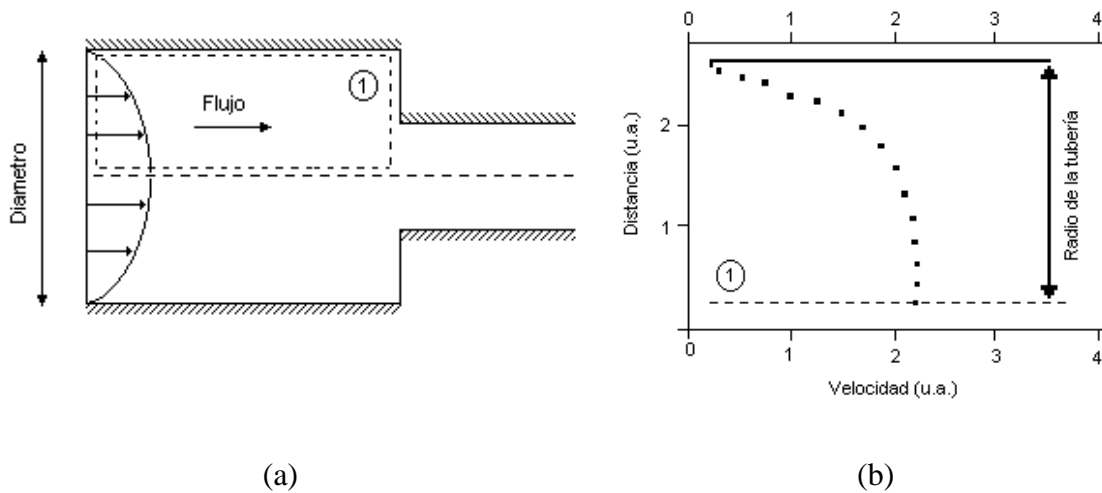


Fig. 2.4. (a) Tubería cuadrada con cambio abrupto en su sección transversal, (b) ejemplo del perfil de velocidades que se obtendría para una tubería cuadrada utilizando un método numérico [18].

CAPÍTULO III

INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

En esta sección se presentan los arreglos experimentales que se utilizaron para la determinación de la velocidad de las líneas de flujo, y la técnica para la obtención del perfil de velocidades a partir de las ecuaciones de Zapka y Tam.

III.1 EQUIPO

El equipo empleado consta de lo siguiente:

- Un láser Q-switched Nd:YAG (Continuum, modelo Surelite I), utilizado como fuente estándar de ultrasonido, que genera pulsos de ≈ 20 ns, opera a una repetición de 10 Hz, energía de salida hasta 150 mJ por pulso y para nuestro caso una longitud de onda de 532 nm.

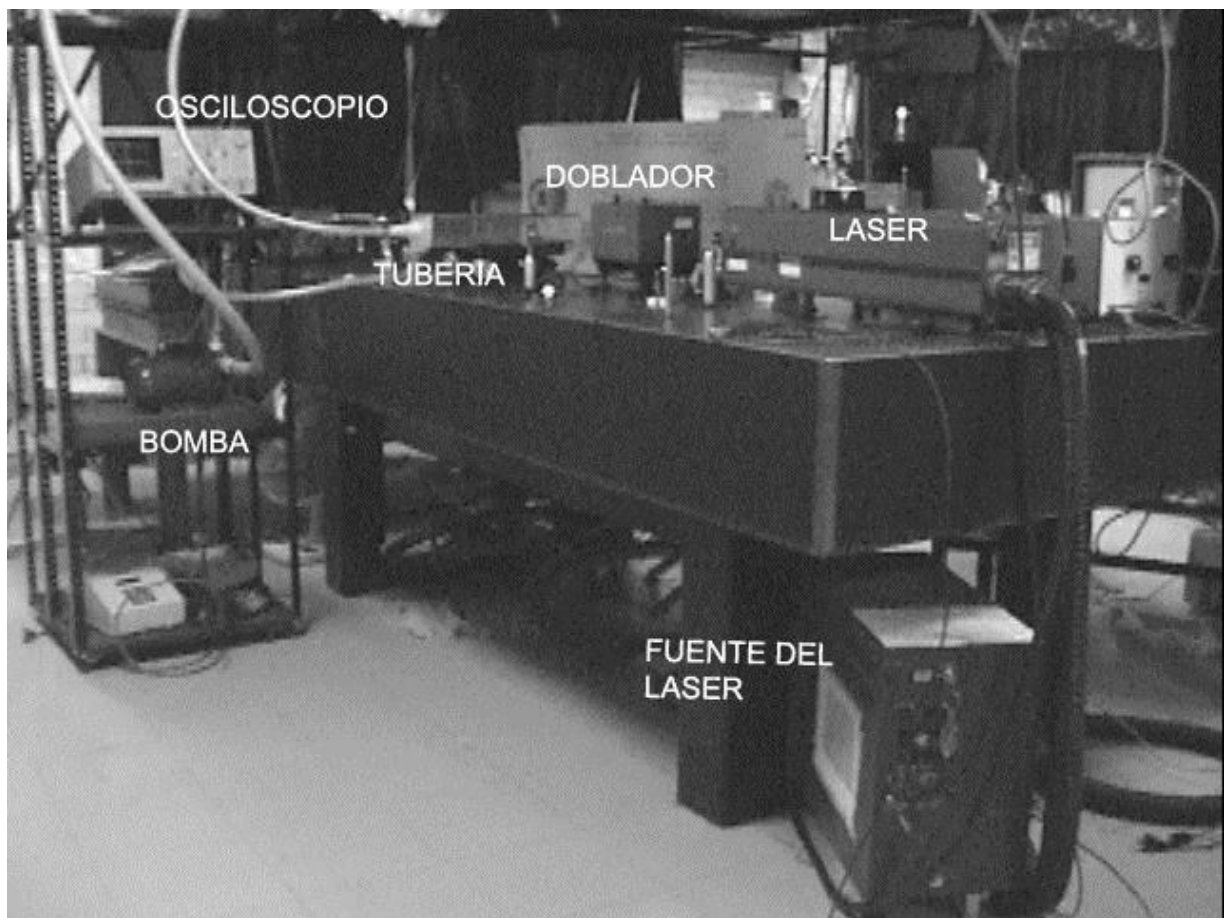


Fig. 3.1. Fotografía del Nd:YAG Continuum, modelo Surelite I.

- La energía del láser fue registrada por un detector piroeléctrico (modelo Lab Master Ultima, con un detector P10i) de Coherent Inc.
- Un fotodiodo de respuesta rápida ($t_r = 1$ ns, típico) de Motorola (modelo MRD500, para sincronizar el osciloscopio con el disparo del Nd:YAG).

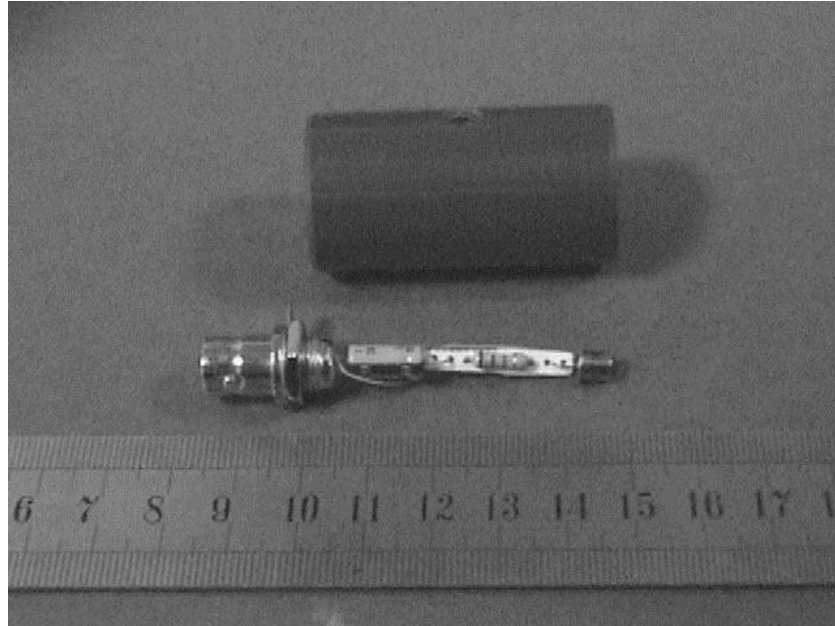


Fig.3.2. Fotodiodo MRD500 con base.

- Un fotodiodo de respuesta rápida < 2 ns (modelo V 0111.00) de LaserOptics S.A., como fotodetector para recibir la señal deflectada.

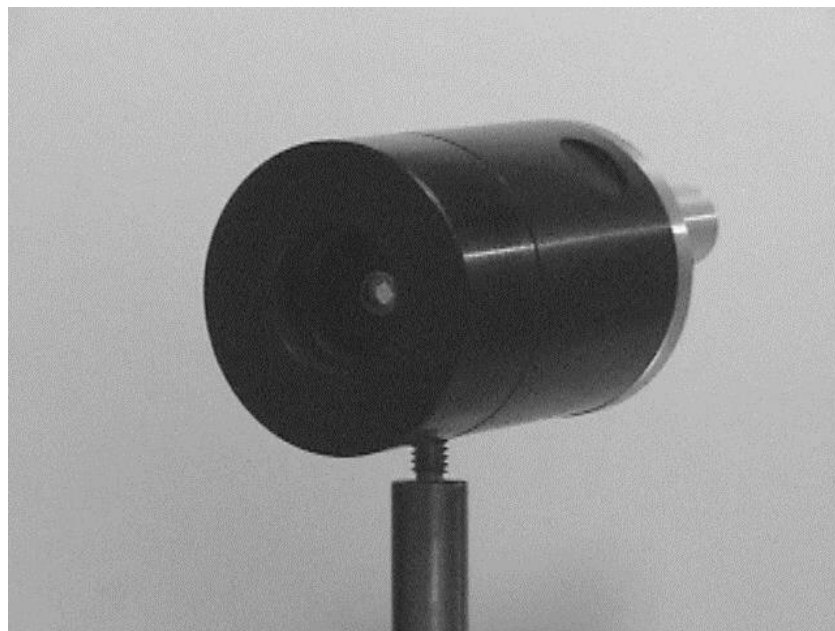


Fig. 3.3. Fotodiodo de LaserOptics S.A.

- Una lente con longitud focal de 75 mm para enfocar el pulso láser en el centro de la tubería.

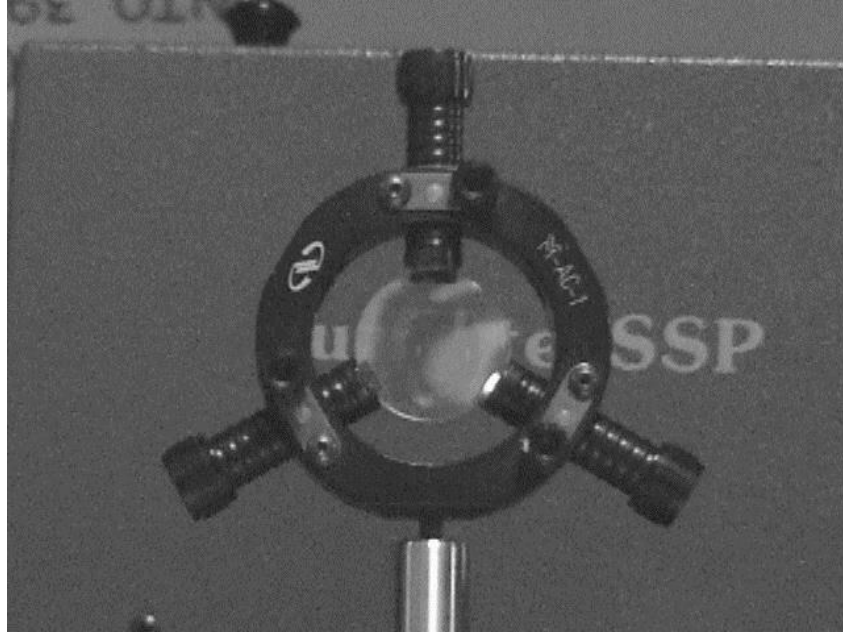


Fig. 3.4. Lente con longitud focal de 75 mm.

- Dos diodos láser continuos como referencia (modelo 0221-035-50), de Coherent Inc., con su respectiva fuente de + 5 V de CD.

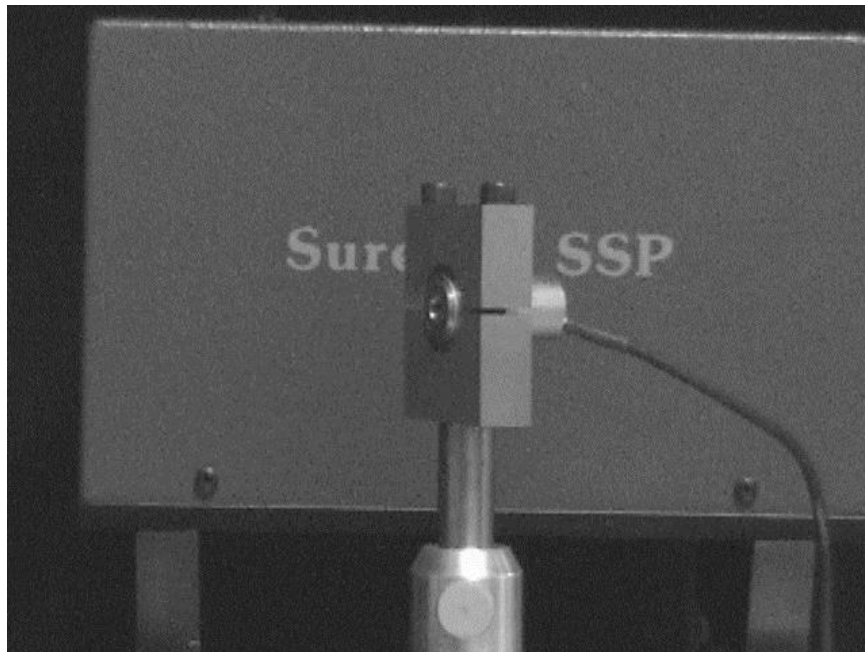


Fig. 3.5. Diodo láser de Coherent Inc., modelo 0221-035-50.

- Un osciloscopio (modelo TDS540A) de Tektronix, para adquirir y grabar las señales.

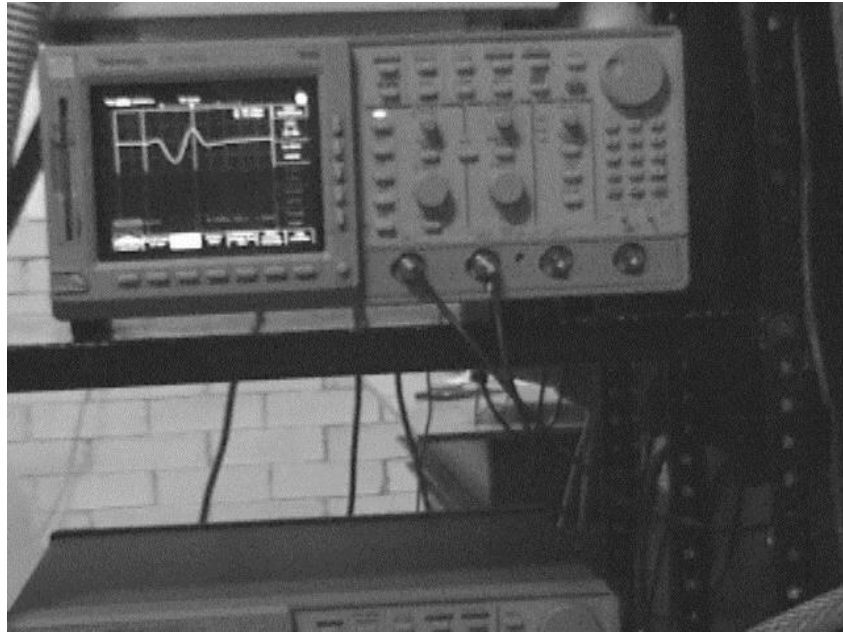


Fig. 3.6. Osciloscopio Tektronix, modelo TDS540A.

- Una bomba (modelo HT300, de 3/4 HP) de F&Q Pumps, para impulsar el fluido a través de la tubería.



Fig. 3.7. Bomba F&Q Pumps, modelo HT300, de 3/4 HP.

- Cables coaxiales con doble blindaje, longitud de 1.5 m y terminales BNC, utilizados para conectar los sensores al osciloscopio.

III.2 DEFLECTOMETRÍA CON LÁSER CONTINUO

La técnica de deflectometría láser consiste en que, cuando un haz láser atraviesa un medio hay un cambio de índice de refracción en el tiempo, el haz experimenta una desviación que puede ser medida simplemente con un fotodiodo (figura 3.8). Ésta técnica permite conocer los tiempos de arribo de las ondas ultrasónicas [12] referenciadas con respecto al tiempo de aplicación del pulso láser. Las señales deflectadas tienen la característica de ser bipolares así como tener un periodo igual a la mitad del ancho de pulso de luz aplicado, tal como se muestra en la figura 3.9.

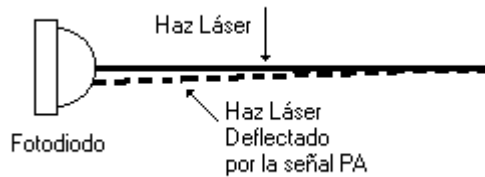


Fig. 3.8. Haz láser deflectado incidiendo en un fotodetector.

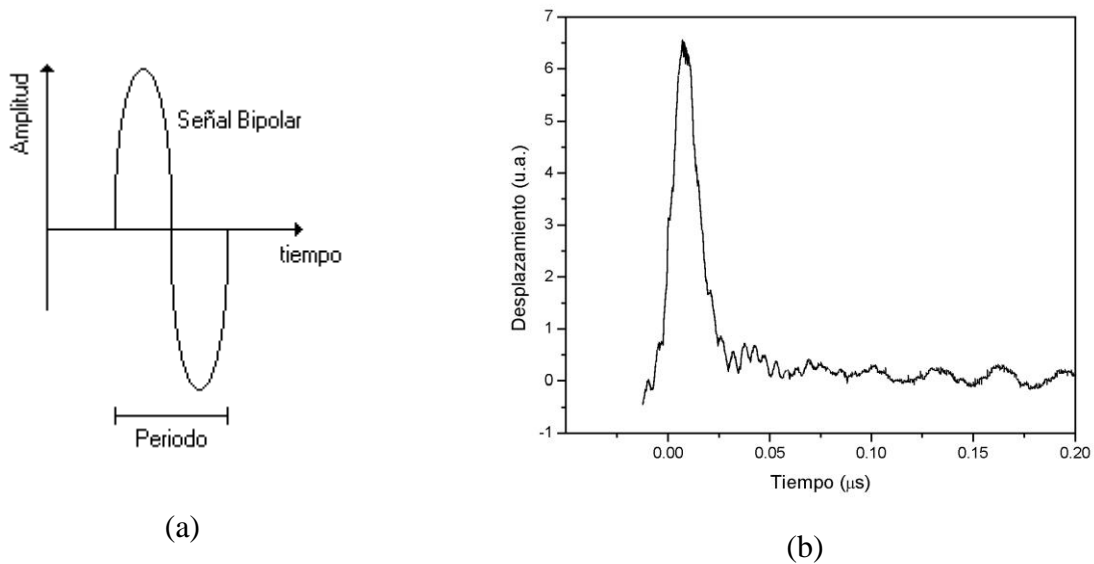


Fig. 3.9. (a) Ejemplo de la deflexión, (b) pulso de luz generado por el Q-switched Nd:YAG utilizado para realizar las pruebas (ancho de pulso = 16 ns, $\lambda = 532$ nm, $E = 23$ mJ).

III.3 METODOLOGÍA

Antes de empezar a realizar las pruebas, es necesario encender el equipo y dejarlo que se estabilice de 40 minutos a una hora, para evitar que quede aire dentro de la tubería y que existan variaciones en la energía de los láseres.

El sistema de medición funciona de la siguiente manera: se emplea un pulso láser como fuente de ondas ultrasónicas, las cuales son generadas al enfocar un pulso láser de alta energía² en el seno del fluido (dentro de una tubería). Estas ondas ultrasónicas se desplazan a través del volumen del fluido hasta interactuar con dos haces láser continuos (cw) que se colocan cada uno a determinadas distancias (8, 10 u 11 cm) a partir de donde es aplicado el pulso láser; los diodos láser son la referencia aguas arriba y aguas abajo del punto de enfoque.

El pulso acústico modificado por la velocidad del flujo perturba los cw causando una deflexión transitoria que es detectada por el conjunto de navaja y fotodetector. Las señales obtenidas por el fotodetector son entonces registradas y almacenadas por un osciloscopio para su análisis posterior.

III.4 ARREGLO EXPERIMENTAL

Se diseñaron dos arreglos experimentales, uno con una tubería de sección circular y otro de sección cuadrada. La figura 3.10 muestra el diagrama esquemático del arreglo experimental para la determinación del perfil de velocidades para ambos arreglos.

El arreglo experimental con tubería circular utilizó un tubo de pirex de 2.54 cm de diámetro, 70 cm de longitud y 3 mm de espesor. Los experimentos se realizaron a una distancia de 35 cm de la entrada de flujo en la tubería.

Debido a la curvatura natural de la tubería, el haz era dispersado y difractado al atravesar la tubería, a excepción de pasar por el centro; esto puede ser corregido con arreglo de lentes. Sin embargo, dicha corrección debía ser hecha para cada punto de medición del barrido, y ya que no se contaba con la cantidad suficiente de lentes, la toma de datos llegaba a tardarse mucho tiempo.

Dados los inconvenientes encontrados al usar una tubería circular, se utilizó una tubería de sección cuadrada para poder realizar el barrido con facilidad y en menor tiempo. Dicha tubería se construyó en acrílico transparente con 40 cm de longitud, sección interna cuadrada de 5 x 5 cm² y 4 mm de espesor.

² Se considera Alta Energía cuando es posible generar ondas de choque en un medio.

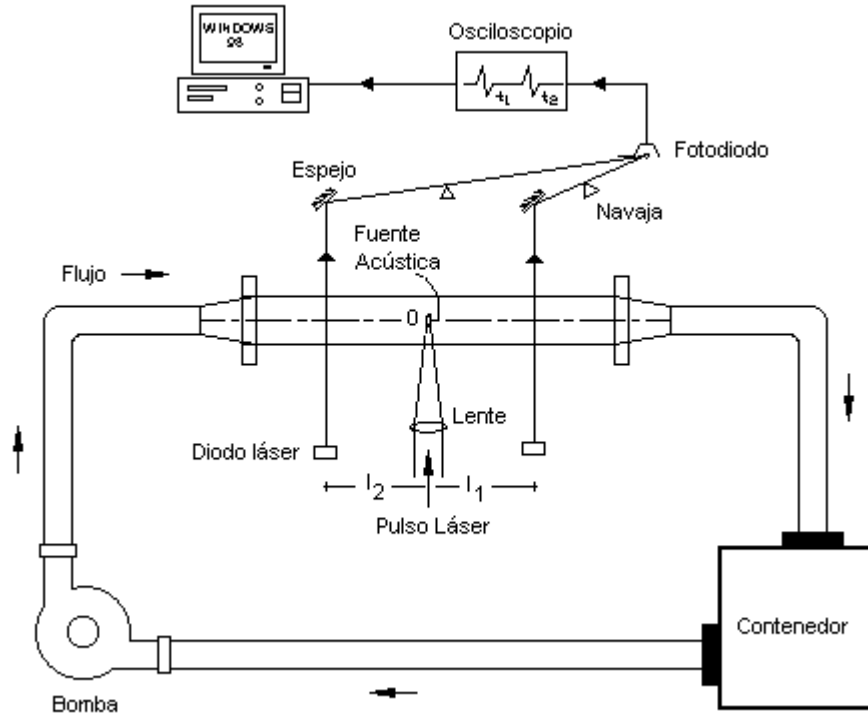


Fig. 3.10. Arreglo experimental para el registro fotoacústico del perfil de velocidades en una tubería cualquiera con agua.

Para obtener el perfil de velocidades, se fijó la tubería de acrílico con sección cuadrada a una estación de traslación vertical (ver figura 3.11.), la cual se movía de manera ortogonal a la dirección del haz de excitación, haciendo un “barrido” a partir de la frontera superior de la tubería tomando mediciones espaciadas cada 3 o 5 mm una de la otra hasta alcanzar la frontera inferior de la tubería; cabe señalar que cada haz de prueba era paralelo al pulso de excitación. La figura 3.12 muestra el arreglo experimental para tubería circular y cuadrada. El procedimiento fue repetido cinco veces como mínimo, con el fin de obtener un promedio y minimizar errores.

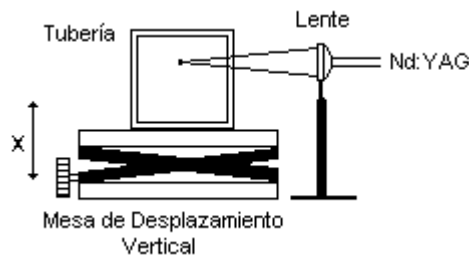
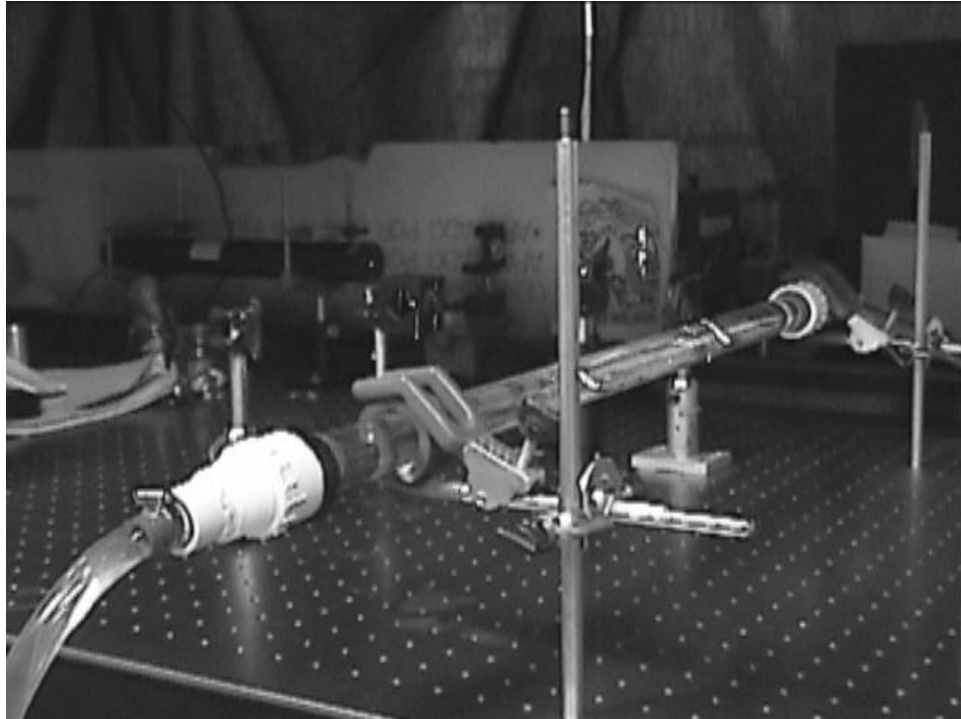
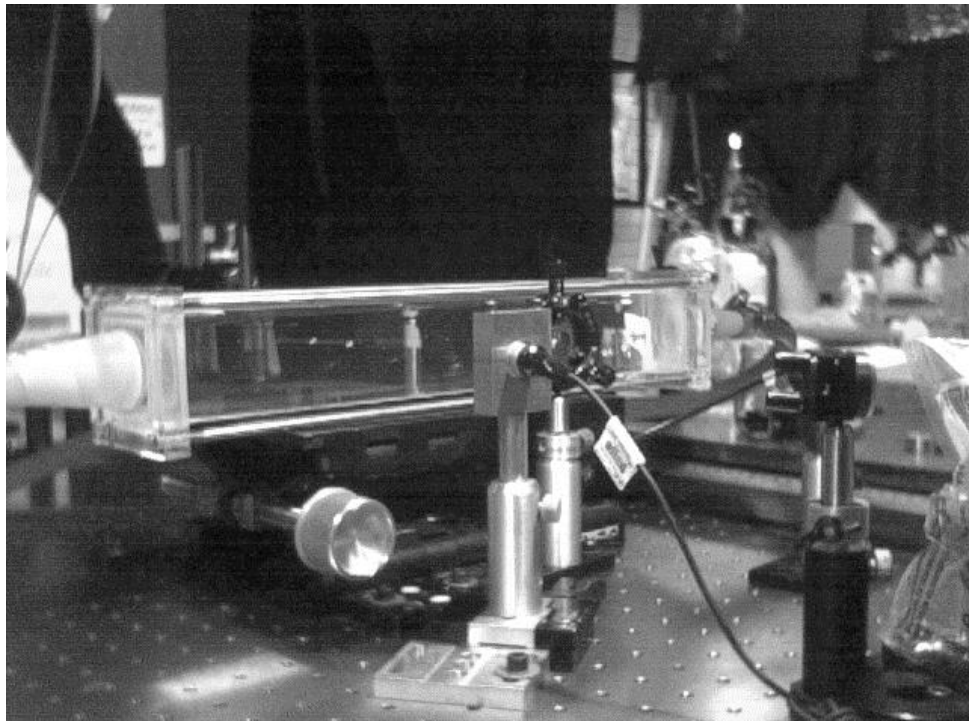


Fig. 3.11. Corte transversal de la tubería.



(a)



(b)

Fig. 3.12. (a) Fotografía del arreglo experimental con tubería circular, (b) con tubería cuadrada.

III.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS ONDAS GENERADAS POR EL PULSO FOTOACÚSTICO EN MEDIO ESTÁTICO

En principio, la caracterización del sistema (figura 3.13) se realizó haciendo un mapeo de la onda PA dentro de un contenedor rectangular con agua a una temperatura de 20°C, para conocer la forma de la señal, energía mínima necesaria para producir solo ondas ultrasónicas y predecir los tiempos de arribo de éstas en diferentes posiciones y distancias entre el punto de origen y las líneas de prueba estando siempre en régimen elástico. Los parámetros anteriores se variaron hasta lograr que el factor de corrección por onda de choque δ fuera despreciable y con esto lograr que se simplifique la ecuación 17 del capítulo anterior.

La obtención de la energía mínima para producir ondas ultrasónicas se logró haciendo pruebas a una sola distancia y con diferentes valores de energía del láser. Se sabe de antemano que la velocidad del sonido en el agua es de 1450 m/s, así, midiendo la distancia y el tiempo de arribo de la señal se conoce la velocidad de la onda producida y se toma la energía mínima en donde la velocidad resulte ≈ 1450 m/s, la cual resultó de 3.5 mJ aproximadamente para una longitud de onda de 532 nm en el Nd:YAG utilizado y con un ancho de pulso de ≈ 18 ns.

El mapeo cardinal se realizó tomando como punto de origen el punto de generación del pulso PA, a su vez, se utilizó un diodo láser para generar una línea de prueba, siendo desplazado en tres direcciones: Y, -X, X, en un rango de 5 a 20 cm, para cada dirección. Con esto fue posible conocer los tiempos de arribo de la señal a diferentes distancias y distintas posiciones.

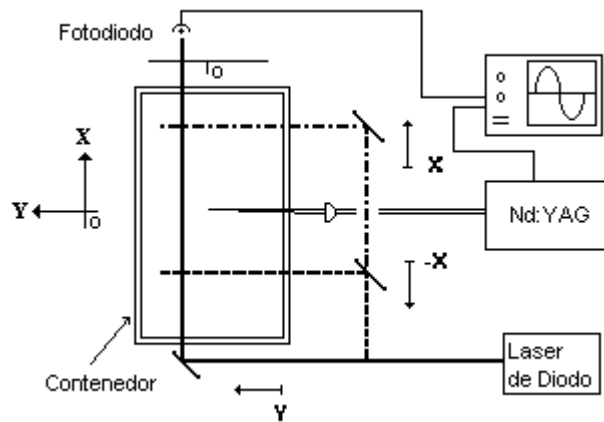


Fig. 3.13. Arreglo experimental para la caracterización de las ondas generadas en agua.

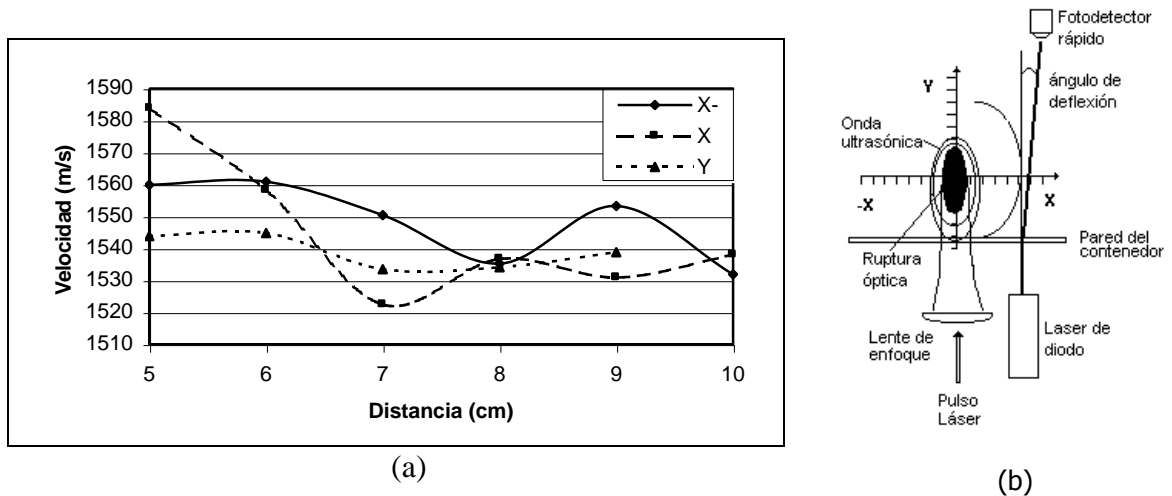


Fig. 3.14. (a) Velocidades de la onda de choque en las posiciones $-X$, X , Y en el intervalo (5 cm, 10 cm), (b) Posiciones respecto al pulso PA de $-X$, X , Y .

La figura 3.14. (a) muestra las velocidades obtenidas a partir de los tiempos de arribo registrados para diferentes distancias, de un promedio de cinco mediciones para la caracterización de este sistema. Se puede apreciar cómo la velocidad de la onda PA se estabiliza conforme se aleja del pulso aplicado, lo cual se debe a la pérdida de energía que presenta la onda PA al atravesar el medio. Con esto es posible determinar la distancia máxima a la que se obtiene una señal, con una amplitud (voltaje) lo suficientemente grande, para ser percibida por el fotodetector y no se confunda con ruido. Sin embargo, debido a las limitaciones de espacio en las que fueron realizadas las pruebas, solo fue posible hacerlas hasta una distancia de 20 cm. Por otro lado, la figura 3.14 (b) muestra las posiciones $-X$, X e Y respecto al origen (PA), para las cuales se obtienen las distintas velocidades.

Con esta prueba se determinaron los de tiempos de arribo para cada distancia e indirectamente las velocidades alcanzadas en las diferentes posiciones probadas.

En la tabla 3.1 se muestran las distancias a las que fueron realizadas cinco pruebas de caracterización de la onda y sus correspondientes tiempos de arribo promediados para cada distancia en la tubería de acrílico.

d (cm)	TIEMPO DE ARRIBO PROMEDIO (μs)	ERROR (μs)
5	31.744	± 0.506
6	38.912	± 0.581
7	45.276	± 0.221
8	51.612	± 0.403
9	58.657	± 0.429
10	65.625	± 0.069
11	72.555	± 0.178
12	78.887	± 0.188
13	85.528	± 0.153
14	92.815	± 0.361
15	99.944	± 0.299
16	106.169	± 0.461
17	113.203	± 0.629
18	119.999	± 0.389
19	126.283	± 0.724
20	133.880	± 0.255

Tabla 3.1. Tiempos de arribo promedio a diferentes distancias en tubería de acrílico con medio estático.

Utilizando los tiempos de arribo promedio y las distancias de la tabla anterior, se hizo una regresión no lineal de la ecuación (16) con ayuda del programa Origin6tm, obteniéndose los valores experimentales $R_o \approx 0.00684 \pm 0.07$ m y $C_o \approx 1,473 \pm 4$ m/s.

Los resultados de la ecuación (16) para diferentes distancias del punto de generación a la línea de prueba se muestran en la figura 3.15, en la cual, la línea punteada representa la curva teórica de esta ecuación para una onda de choque cilíndrica. Como puede observarse en esta figura, los valores calculados con la ecuación (16) a partir de los datos experimentales y la curva ajustada de dicha ecuación, concuerdan entre sí para el rango > 5 cm. A partir de este valor la curva se vuelve más lineal.

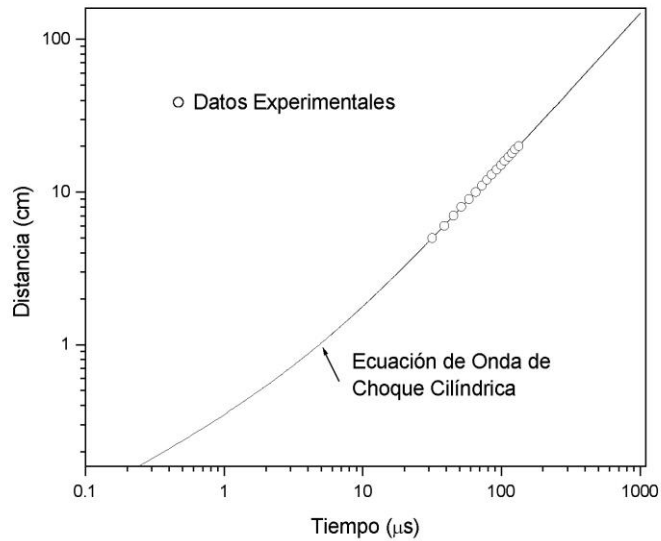


Fig. 3.15. Variación del desplazamiento de la ecuación $R(t) = C_o t [1 + R_o / (C_o t)]^{1/2}$, desde la fuente acústica 0, para obtener la relación entre R y el tiempo de arribo t, en un medio estático.

De estos resultados se concluye que para poder despreciar el factor de corrección δ es necesario mantener las líneas de prueba a distancias mayores de 5 cm, así, en nuestro caso se realizaron dos pruebas, una con l_1 y l_2 igual a 11 cm, calculándose un factor de corrección $\delta \approx 1.32 \times 10^{-3}$; y otra para $l_1 = 10$ cm y $l_2 = 8$ cm en donde se obtuvo un factor de corrección $\delta \approx 7.31 \times 10^{-4}$, en ambos casos dicho factor de corrección puede despreciarse. Dadas las condiciones anteriores y las dimensiones de la mesa de trabajo, se decidió utilizar distancias de prueba de 11, 10 y 8 cm aguas arriba y aguas abajo del punto de generación de la señal PA.

III.6 MEDICIONES DEL TIEMPO DE ARRIBO Y PERFIL DE VELOCIDADES

Para asegurar la confiabilidad de nuestros resultados, las pruebas se repitieron 5 veces para cada perfil, manteniendo constantes las distancias entre la fuente acústica (0), l_1 y l_2 . Todas las señales grabadas durante las pruebas, se obtuvieron usando el modo de adquisición "promedio" entre 3 y 5 segundos. Para tener una resolución adecuada en las pruebas, cada señal fue registrada con 50,000 puntos a una velocidad de muestreo de 250MS/s. El tiempo de arribo de la señal capturada por el osciloscopio se determina, en primera instancia, por inspección visual. Posteriormente, para una mayor precisión, esta señal es analizada mediante un programa especializado en el análisis de datos y en el manejo de gráficas (Excel, Origin6tm, o cualquier otro), con el cual se obtiene la derivada de dicha señal y aplicando el criterio de la primer derivada se toma como tiempo de arribo el primer máximo (o mínimo, según sea el caso) relativo encontrado dentro de un intervalo de $\pm 1.2\%$ del tiempo de arribo que se indica en la tabla 3.1 para una distancia dada, siendo éste el tiempo exacto en el que la señal presenta un cambio en su concavidad.

En la figura 3.16 se observa el frente de onda y su derivada para la obtención del tiempo de arribo.

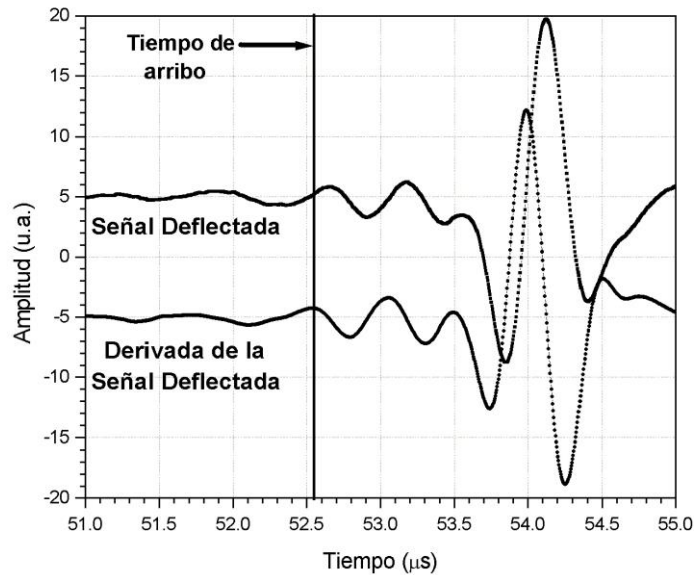
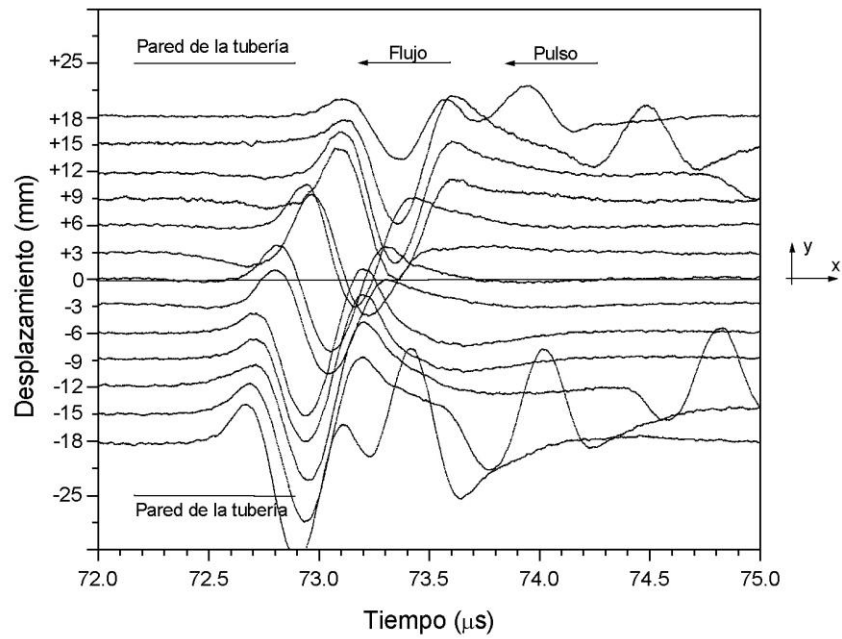


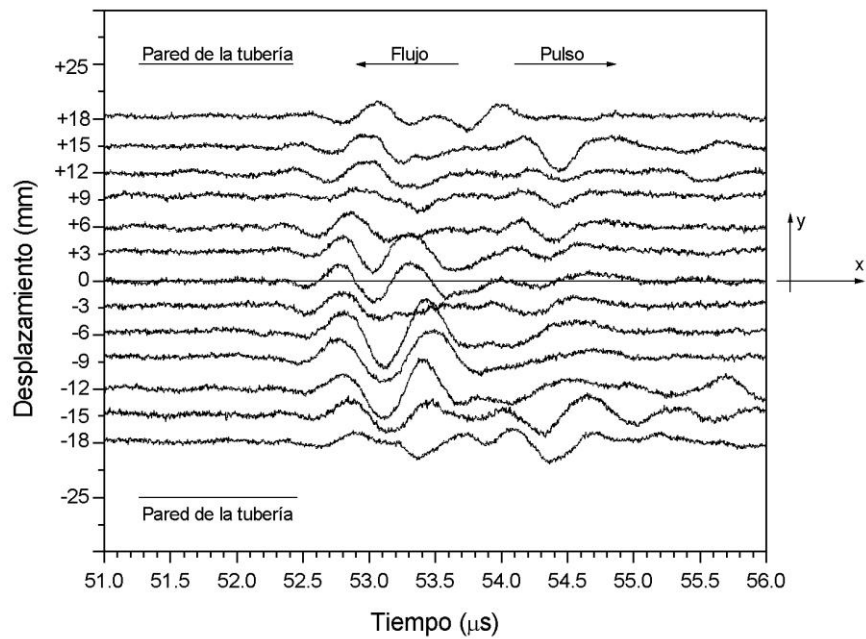
Fig. 3.16. Tiempo de arribo (t_a) de la señal característica deflecionada, a una distancia de 8 cm, así como su derivada; de la cual se toma el tiempo en el que se presenta el máximo relativo como (t_a).

En la figura 3.17, se puede ver el frente de onda a distintas distancias (barrido vertical de la tubería a intervalos de 3 mm o 5 mm) de la pared de la tubería; para los dos frentes de monitoreo.

La velocidad de la línea de flujo fue calculada con la ecuación (16) introduciendo la distancia entre la fuente y los dos haces que actúan como monitor, los tiempos de arribo y el valor experimental de Co . Este procedimiento se utilizó para cada una de las señales del barrido realizado en la tubería de acrílico con flujo de agua, obteniéndose así el perfil de velocidades. Para realizar las regresiones con los modelos matemáticos mencionados en la sección II.4, cada velocidad resultante de la ecuación (16) fue introducida en las ecuaciones de la raíz-enésima para flujo turbulento (18) y de flujo entre placas paralelas (19) con su correspondiente distancia del barrido. Utilizando el programa Origin6tm se hicieron los ajustes no lineales de dichas ecuaciones para obtener tanto la velocidad media del fluido (U_m) para la ecuación (18), como la velocidad media del fluido (U_m) y el índice de turbulencia (n) para la ecuación (19).



(a)



(b)

Fig. 3.17. (a) Barrido de la tubería adquiridos a intervalos de 3 mm con la dirección de la onda PA en el sentido del flujo (para L1 a 11 cm de 0), (b) Barrido de la tubería adquirido a intervalos de 3mm con la dirección de la onda PA en contra del flujo (para L2 a 8 cm de 0).

La figura 3.18 presenta los datos experimentales y sus ajustes a la ecuación de la raíz-n y al modelo de flujo entre placas paralelas.

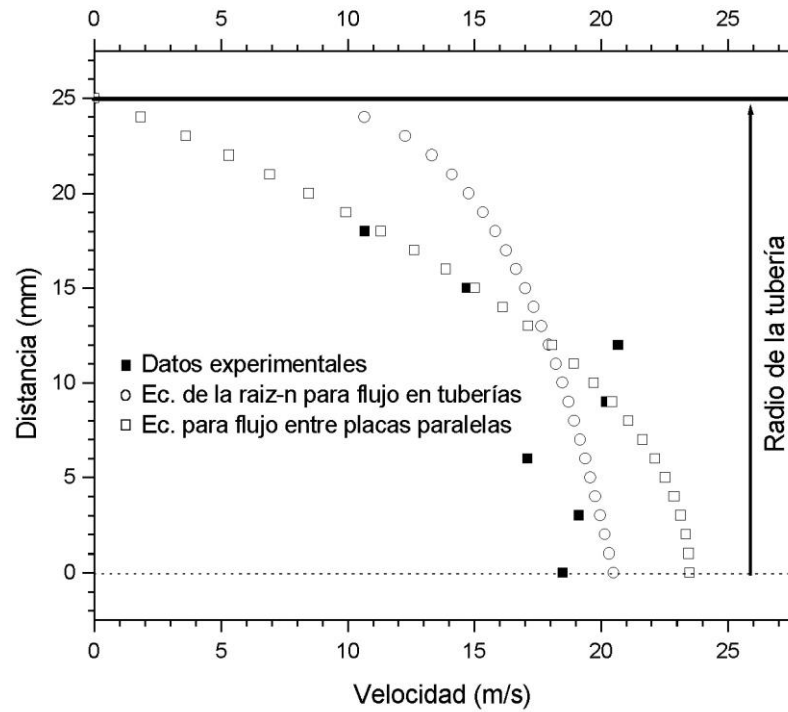


Fig 3.18. Perfiles de velocidades obtenidos a partir de tres modelos matemáticos diferentes.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

IV.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas fueron realizadas bajo diferentes criterios de evaluación, variando condiciones de distancia, temperatura y cantidad de voltaje de salida en el fotodetector, y fueron clasificadas con números para cada perfil obtenido. En la tabla 4.1 se resumen el número del perfil y los parámetros utilizados y/o controlados en cada prueba; más adelante se presentan las gráficas correspondientes a cada perfil. Cabe señalar que todas las pruebas fueron realizadas con una densidad de energía aplicada de $165 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ enfocada en un diámetro³ de $32.45 \mu\text{m}$.

Perfil	Temperatura [°C]	Voltaje del Fotodetector [mV]	Distancia	
			Punto de gen. A la Línea de prueba [cm]	Tubería al Fotodetector [cm]
1	Sin control	Sin control	L1 = L2 = 11	150
2	Sin control	Sin control	L1 = L2 = 11	150
3	Sin control	Sin control	L1 = L2 = 11	150
4	Sin control	Sin control	L1 = L2 = 11	150
5	Sin control	Sin control	L1 = L2 = 11	150
6	28-29	10	L1 = L2 = 11	150
7	28-29	10	L1 = L2 = 11	150
8	10-12	10	L1 = L2 = 11	100
9	10-12	10	L1 = L2 = 11	200
10	10-12	10	L1 = L2 = 11	500
11	10-12	10	L1 = L2 = 11	800
12	28-29	10	L1 = 10, L2 = 8	150
13	28-29	10	L1 = 10, L2 = 8	150
14	28-29	10	L1 = 10, L2 = 8	150
15	28-29	10	L1 = 10, L2 = 8	150
16	28-29	10	L1 = 10, L2 = 8	150
17	28-29	10	L1 = 10, L2 = 8	150

Tabla 4.1. Nombre de los archivos de las señales adquiridas. Perfiles 1-17.

³ Ver Apéndice C

Para las pruebas con variación de la distancia fueron considerados dos casos: las distancias entre los monitores y el punto de generación PA, y la distancia entre la tubería y el fotodetector. Para el primer caso se realizaron pruebas a distancias iguales de $l_1 = l_2 = 11$ cm y a distancias diferentes de $l_1 = 10$ cm y de $l_2 = 8$ cm. Los barridos para los perfiles del 1 al 11 fueron realizados a la misma distancia del punto de generación de la señal PA, con la característica de realizar el barrido de l_1 independientemente del de l_2 . En los barridos 12-17, las pruebas fueron realizadas a distancias l_1 diferentes de l_2 , con la característica de ser adquiridas al mismo tiempo. Para el segundo caso, los barridos 8, 9, 10 y 11 se realizaron variando la distancia entre la tubería y el fotodetector entre 1 m y 8 m.

En los perfiles 8-11 se realizaron las pruebas manteniendo la temperatura entre 10 °C y 12 °C y para los perfiles 6-7, 12-17 manteniendo la temperatura entre 28 °C y 29 °C. Para los perfiles 1-5 no se controló la temperatura.

Los perfiles 1-5 se realizaron sin control de voltaje a la salida del fotodetector. Del perfil 6-17 se controló este voltaje con la técnica de la navaja, manteniéndolo constante e igual a 10 mV para ambas líneas de prueba.

IV.2 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas, así como las gráficas en donde se muestran los ajustes con los modelos analíticos descritos en el capítulo II. Cabe señalar que cada uno de los perfiles de velocidades, exceptuando los primeros cinco, es desplegado en dos gráficas, una que muestra el perfil de la mitad superior de la tubería y otra en la que se aprecia el perfil de la parte inferior.

De esta manera, procedemos a presentar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, comenzando por los perfiles 1 al 5, correspondientes al 29 de noviembre de 2002, mostrados en las figuras 4.1 a la 4.5.

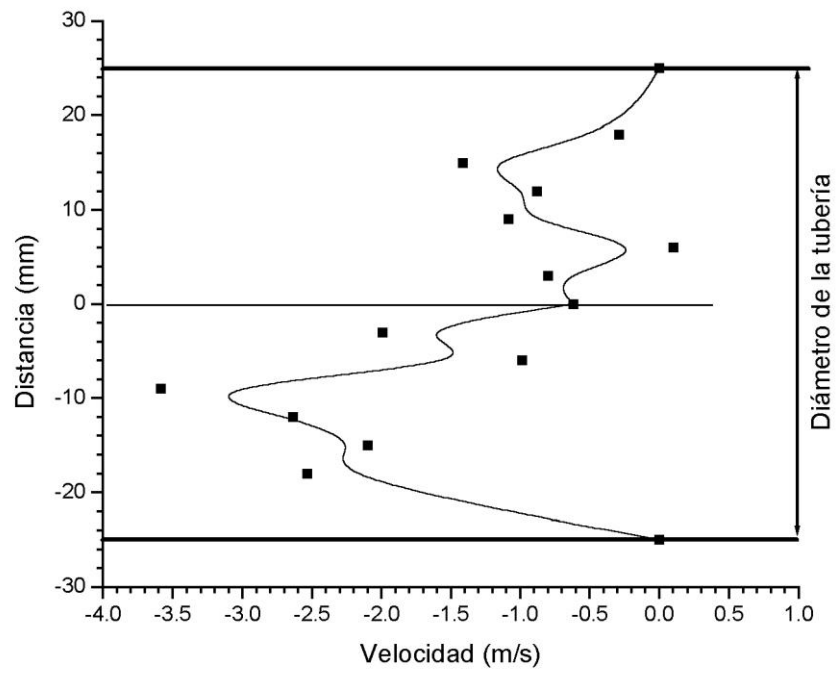


Fig. 4.1. Perfil de velocidades 1.

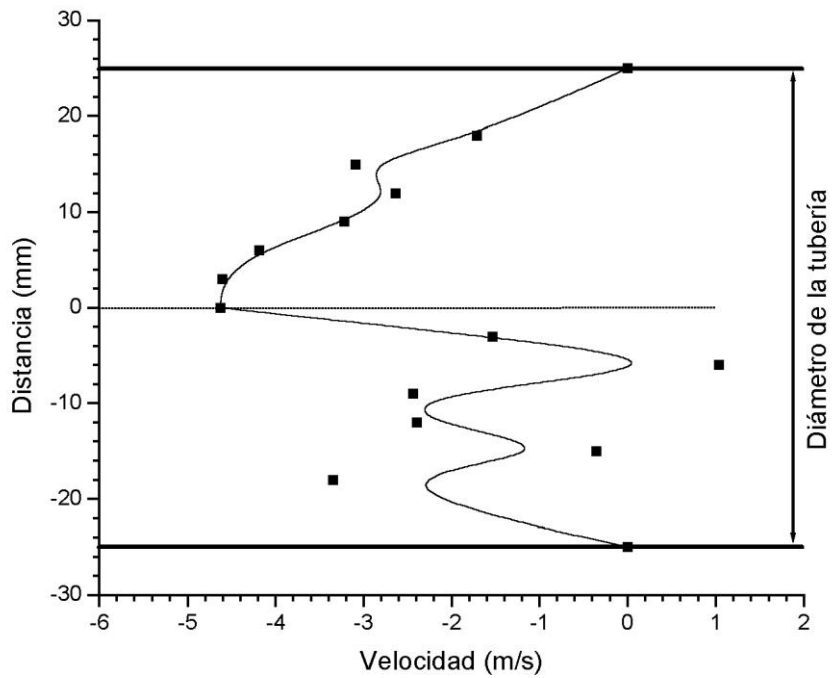


Fig. 4.2. Perfil de velocidades 2.

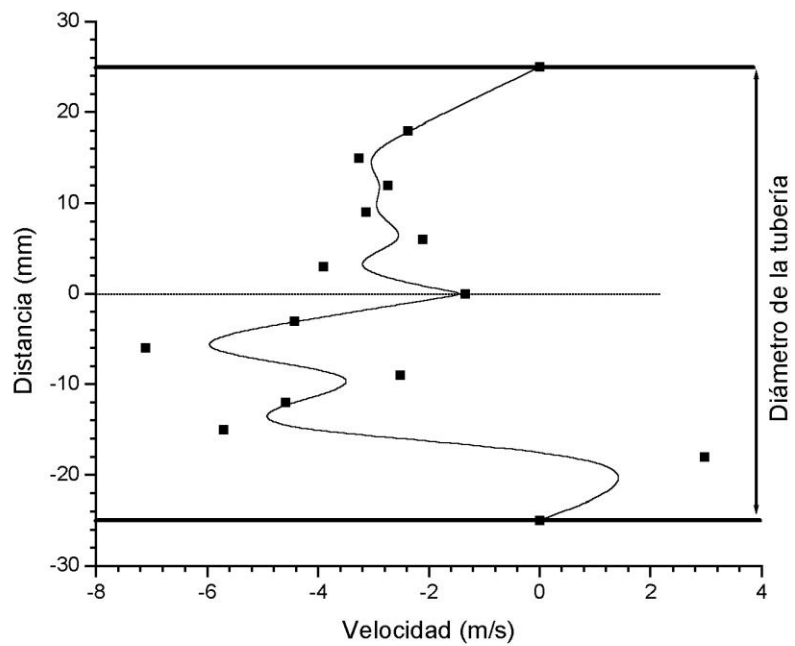


Fig. 4.3. Perfil de velocidades 3.

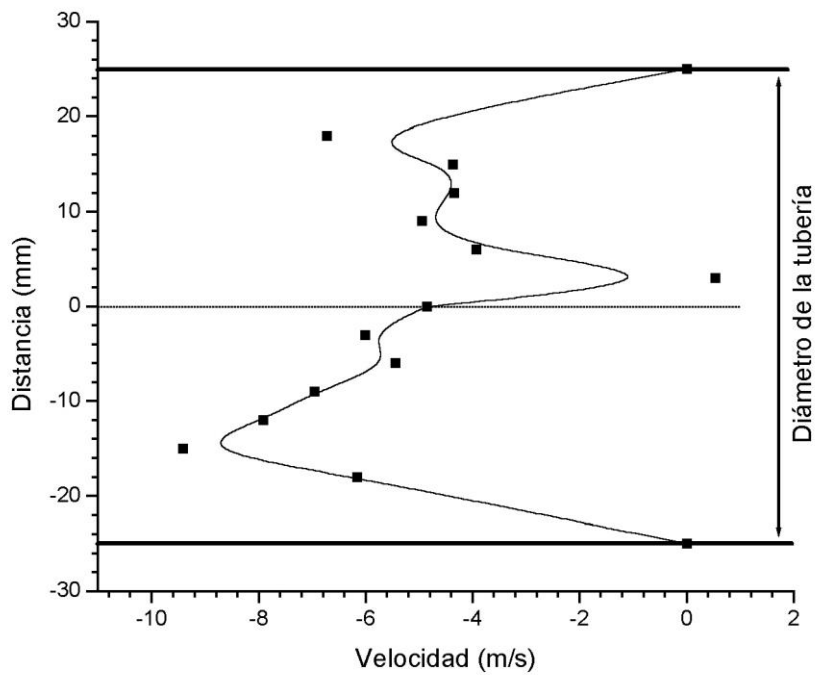


Fig. 4.4. Perfil de velocidades 4.

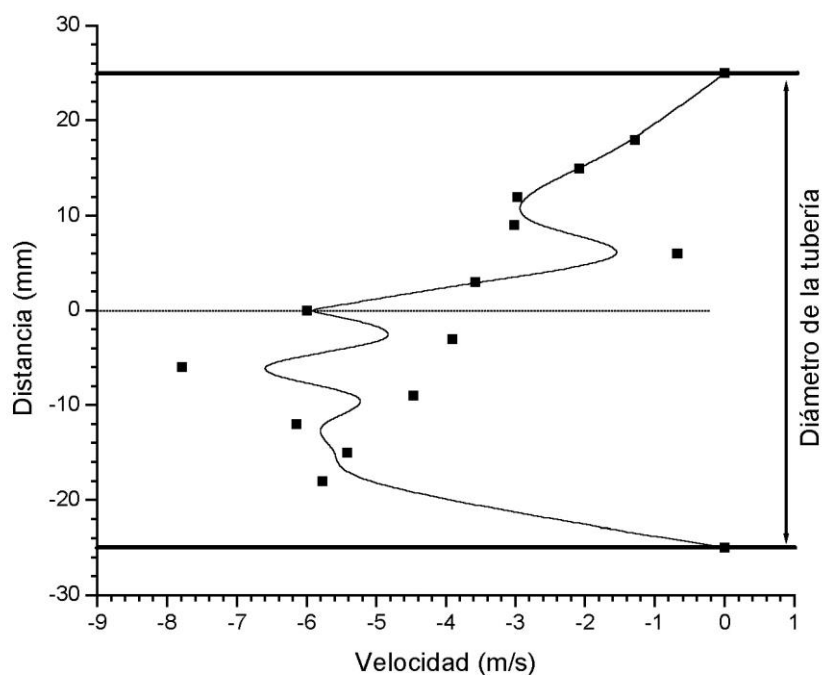


Fig. 4.5. Perfil de velocidades 5.

En los perfiles 8-11, se realizó un promedio de las velocidades obtenidas para cada una de las posiciones del barrido en la tubería y se presentan en la siguiente tabla

Distancia (cm)	Velocidad promedio de las líneas de flujo (cm/s)
2.5	0
1.8	348.0966727
1.5	448.7163759
1.0	558.4211761
0.5	558.3444086
0.0	579.8019354
-0.5	576.9228071
-1.0	529.3902925
-1.5	498.076924
-1.8	549.4351076
-2.5	0

Tabla 4.2. Velocidad promedio de las líneas de flujo en los perfiles 8-11

A su vez se presentan las gráficas de los resultados experimentales y su ajuste a los modelos analíticos de raíz-n y de placas paralelas.

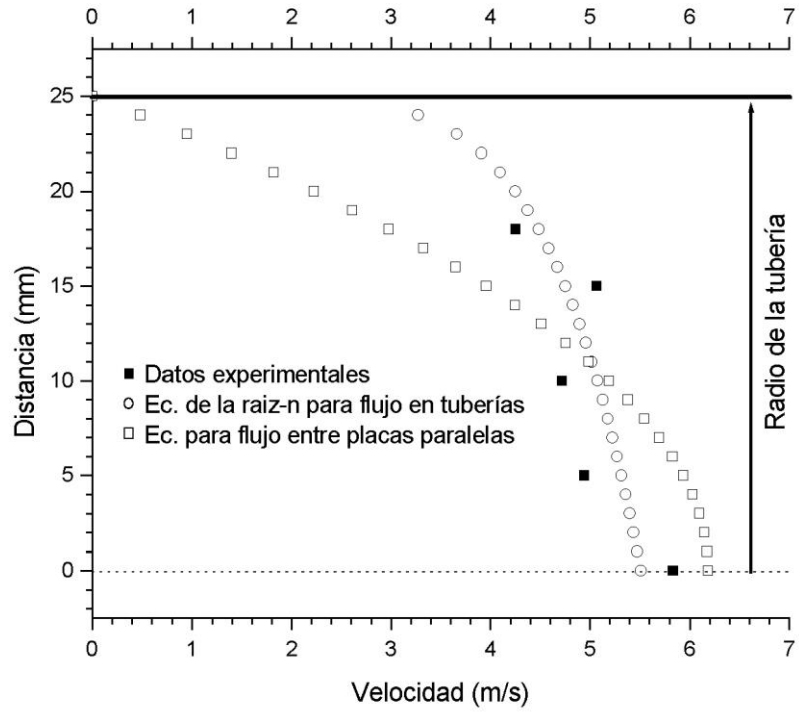


Fig. 4.6. Perfil de velocidades 8, parte superior.

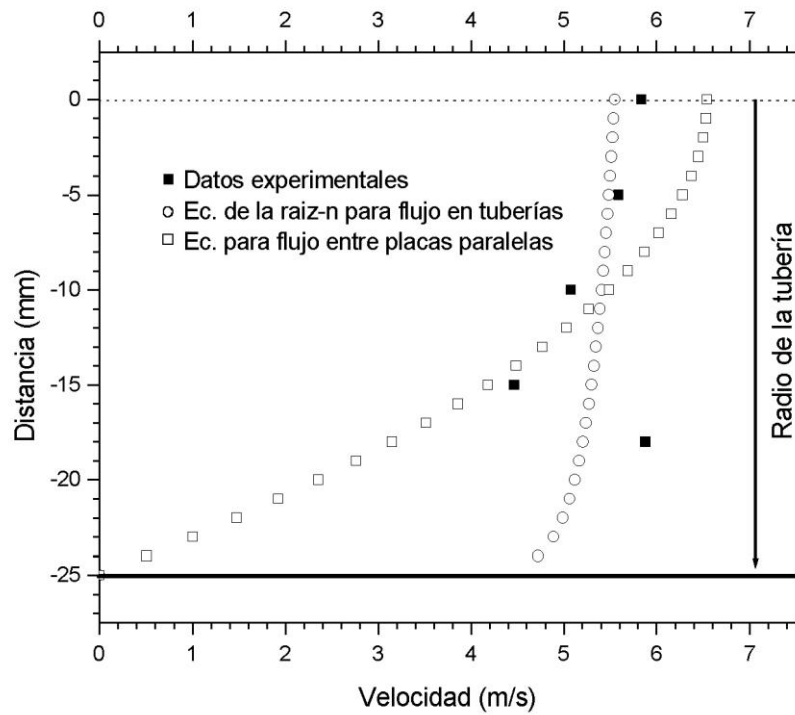


Fig. 4.7. Perfil de velocidades 8, parte inferior.

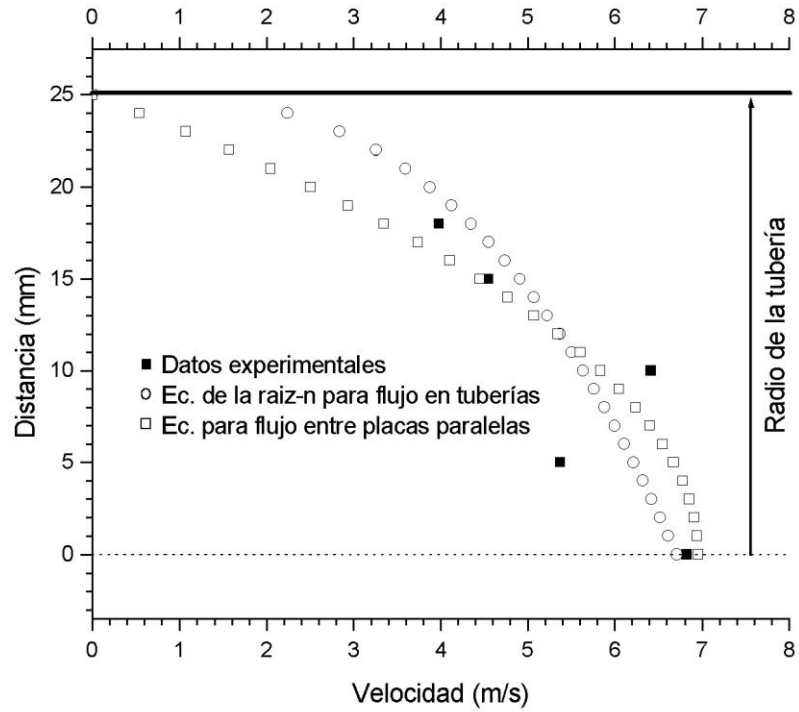


Fig. 4.8. Perfil de velocidades 9, parte superior.

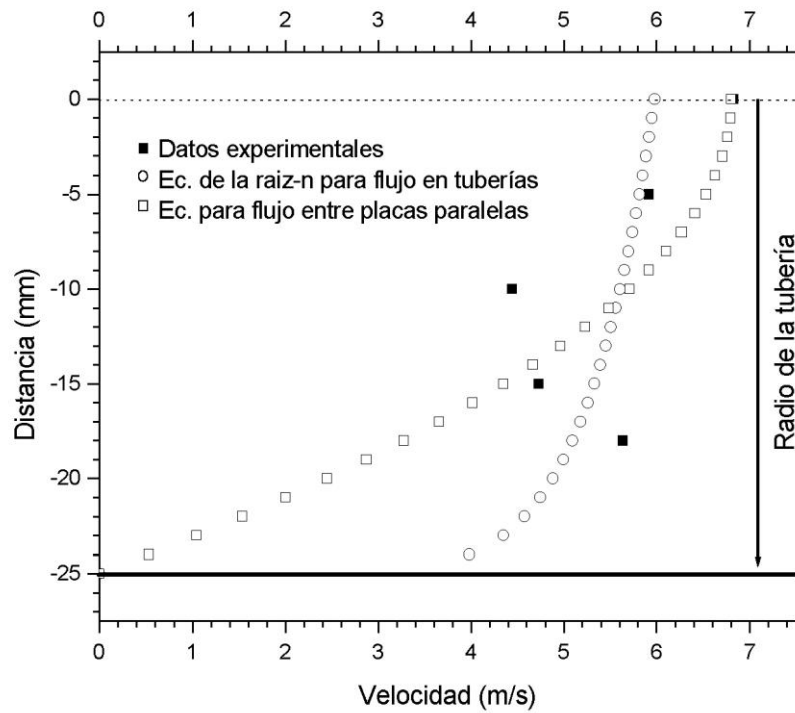


Fig. 4.9. Perfil de velocidades 9, parte inferior.

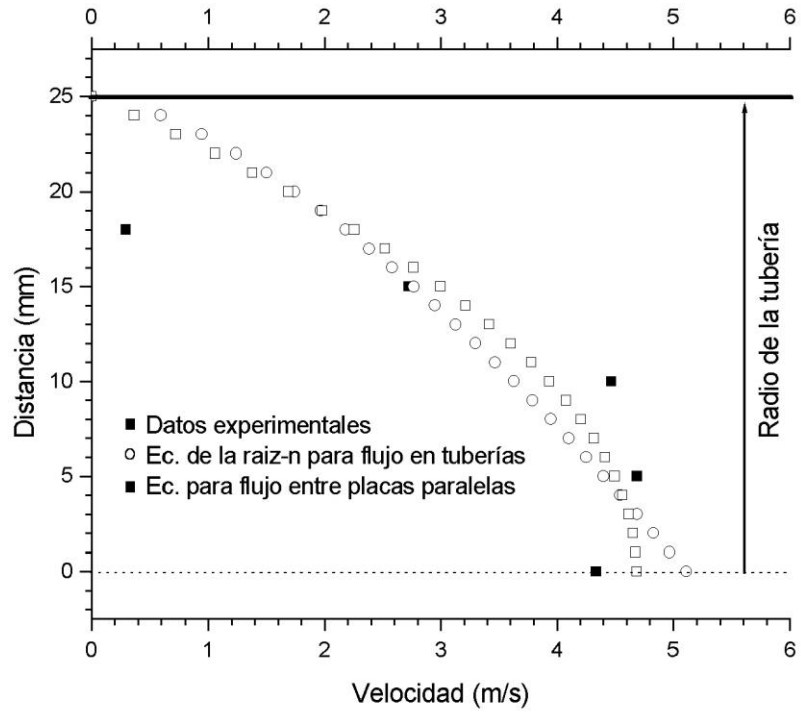


Fig. 4.10. Perfil de velocidades 10, parte superior.

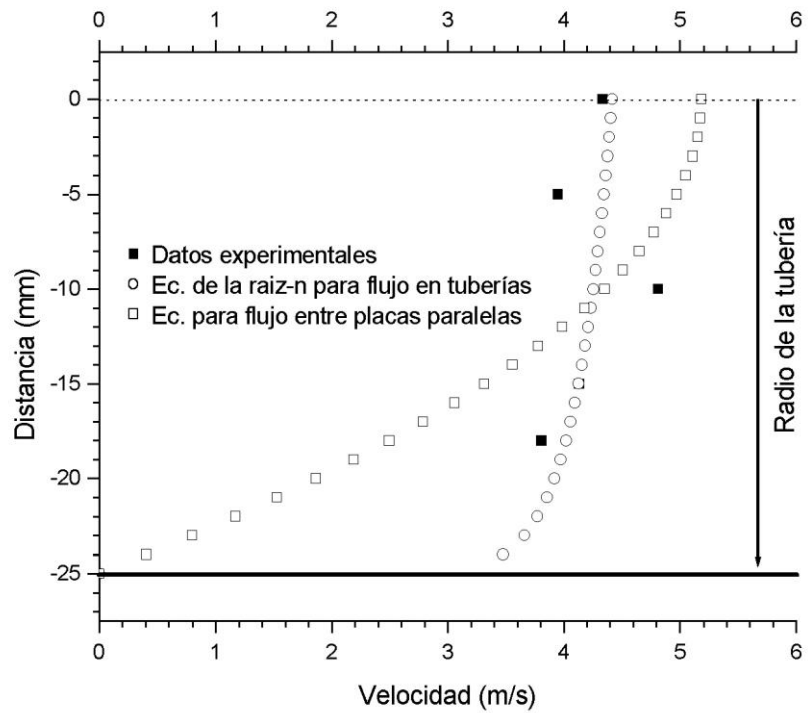


Fig. 4.11. Perfil de velocidades 10, parte inferior.

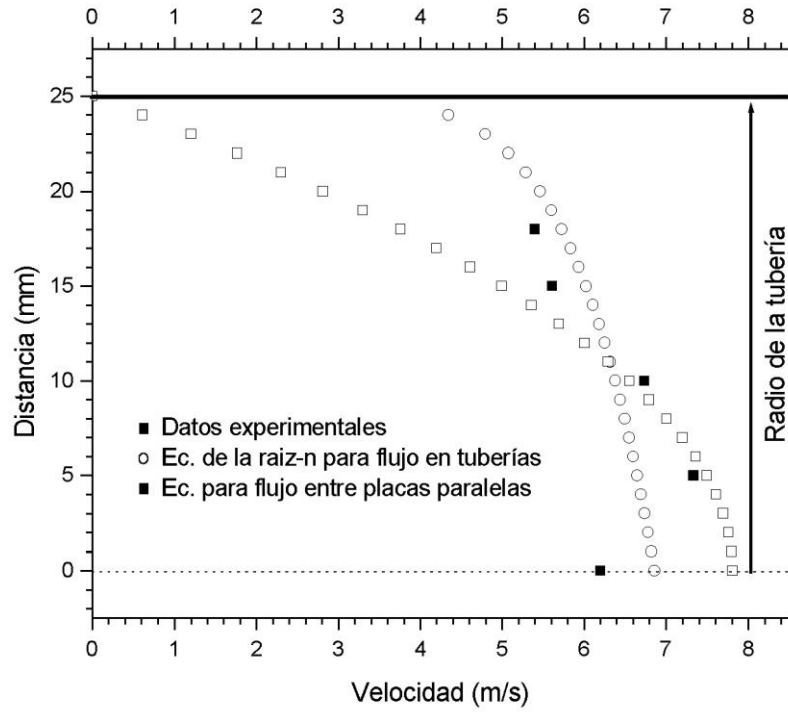


Fig. 4.12. Perfil de velocidades 11, parte superior.

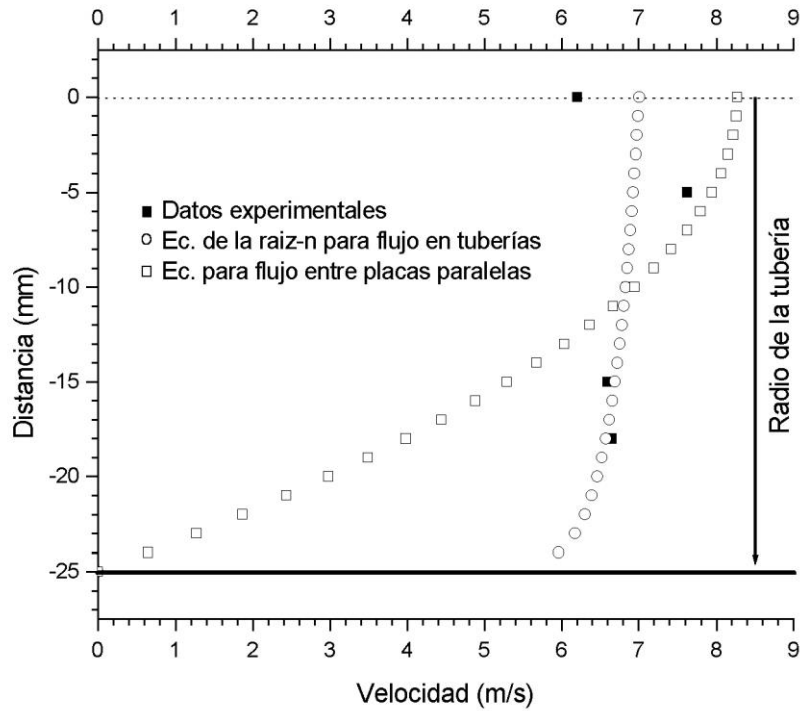


Fig. 4.13. Perfil de velocidades 11, parte inferior.

En los perfiles 6-7 y 12-17, se presentan los valores de las velocidades promedio de las líneas de flujo.

Distancia (cm)	Velocidad promedio de las líneas de flujo (cm/s)
2.5	0
1.8	1592.73325
1.5	1638.41382
1.2	1982.06034
0.9	2240.30203
0.6	2110.59408
0.3	1922.09129
0	1640.23848
-0.3	1782.76198
-0.6	1638.35374
-0.9	1866.45447
-1.2	2107.81041
-1.5	2170.01443
-1.8	1698.72097
-2.5	0

Tabla 4.3. Velocidad promedio de las líneas de flujo en los perfiles 6-7 y 12-17

Asimismo se presentan las gráficas de los resultados experimentales y su ajuste a los modelos analíticos de raíz-n y de placas paralelas

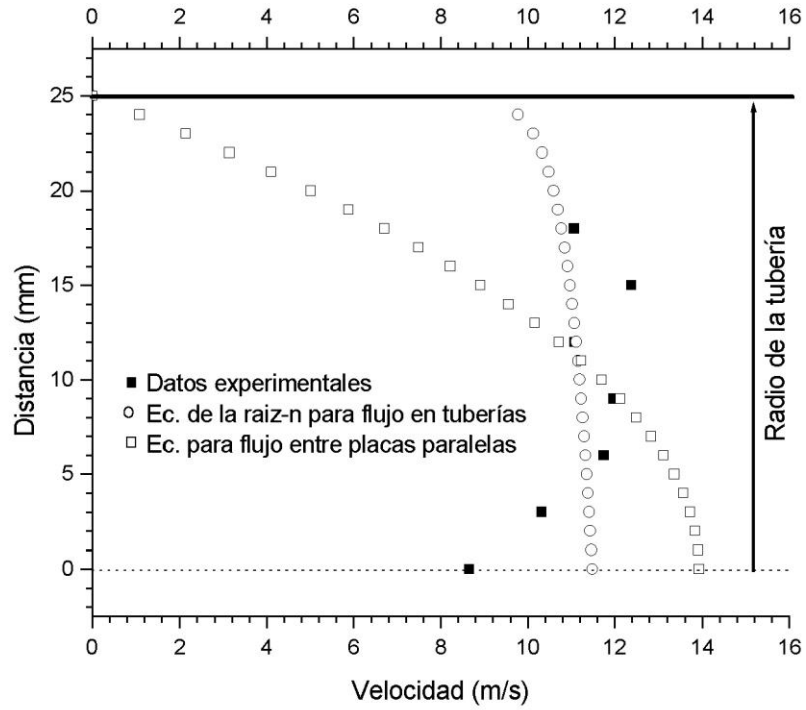


Fig. 4.14. Perfil de velocidades 6, parte superior.

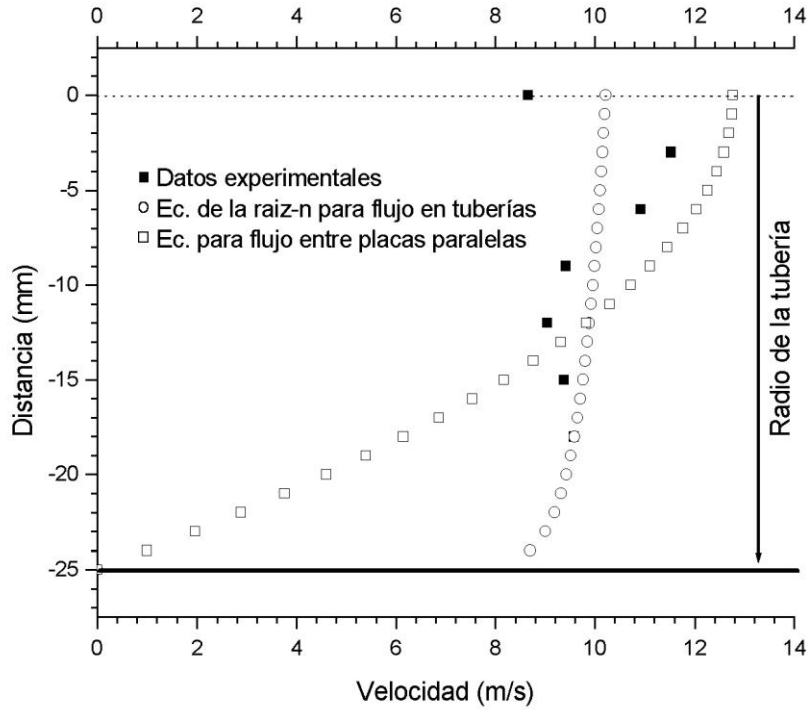


Fig. 4.15. Perfil de velocidades 6, parte inferior.

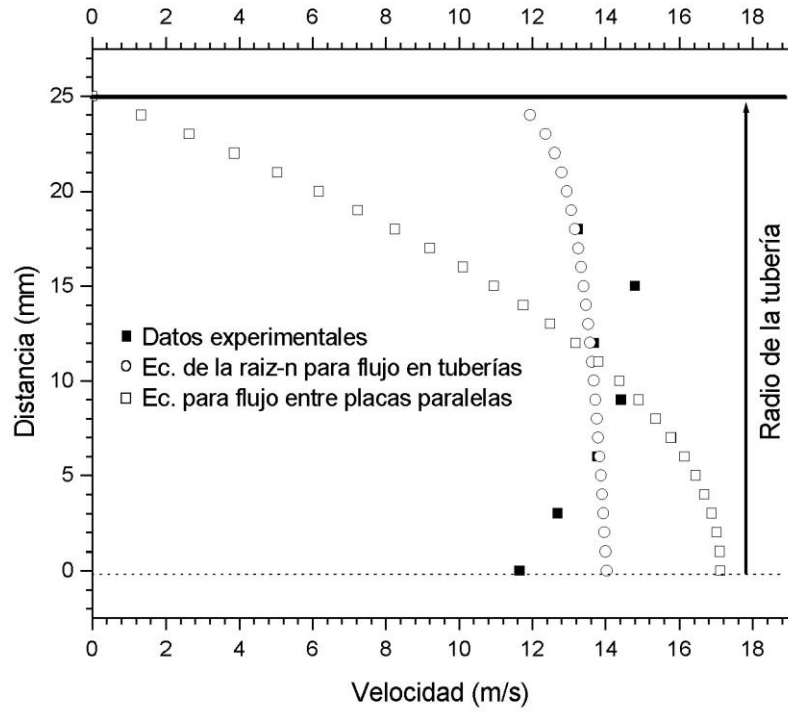


Fig. 4.16. Perfil de velocidades 7, parte superior.

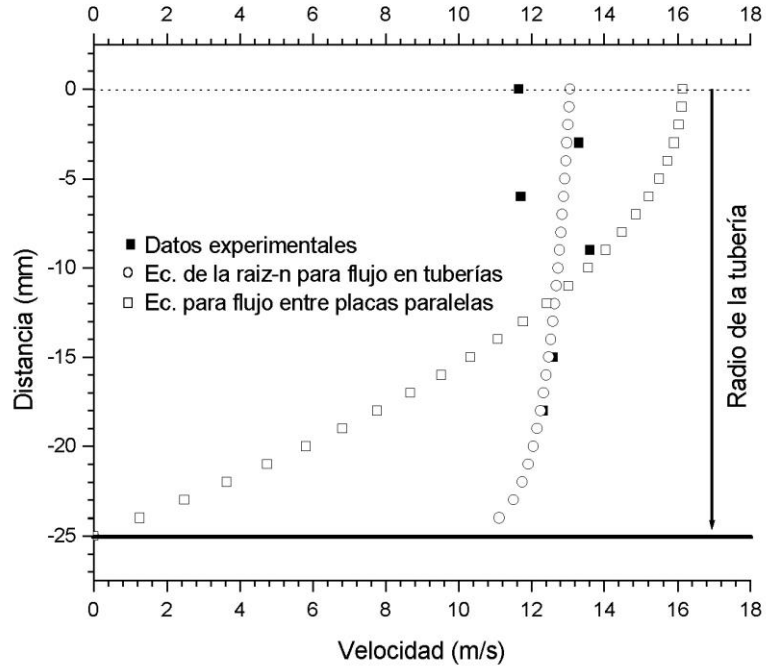


Fig. 4.17. Perfil de velocidades 7, parte inferior.

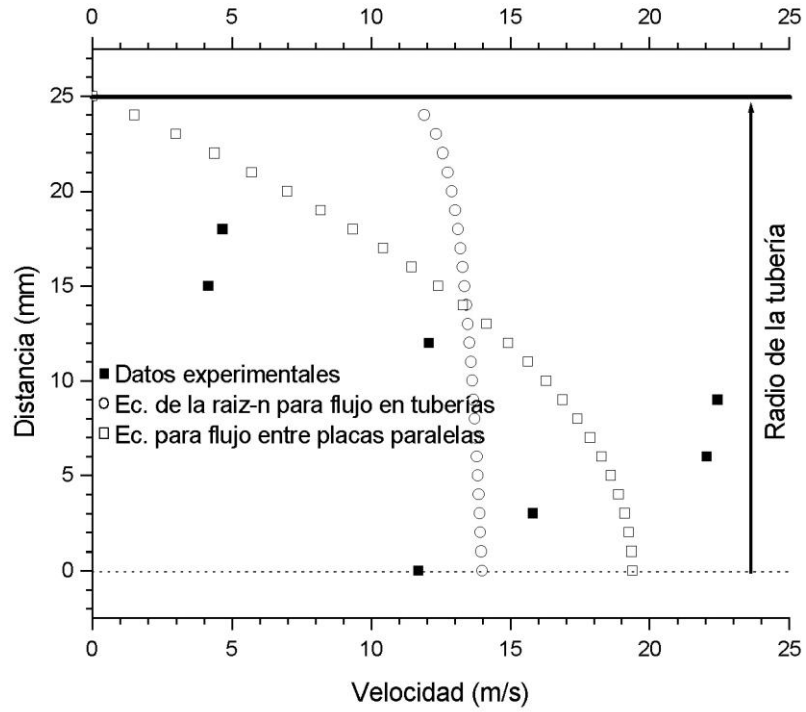


Fig. 4.18. Perfil de velocidades 12, parte superior.

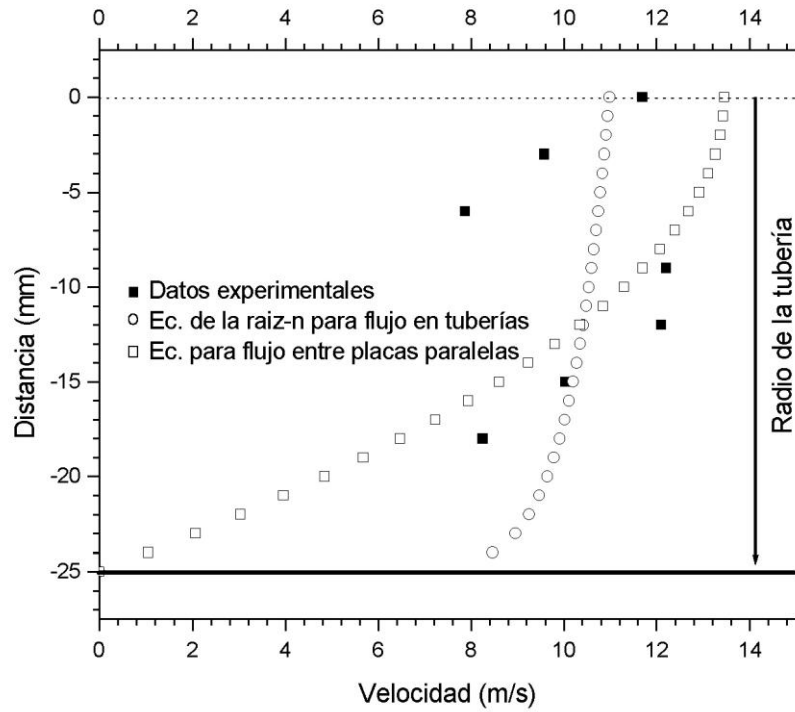


Fig. 4.19. Perfil de velocidades 12, parte inferior.

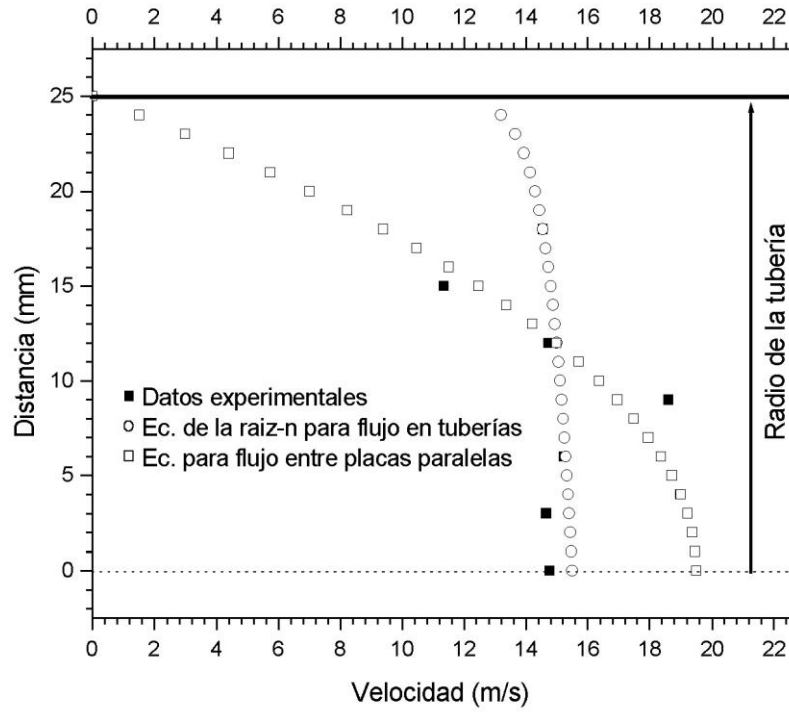


Fig. 4.20. Perfil de velocidades 13, parte superior.

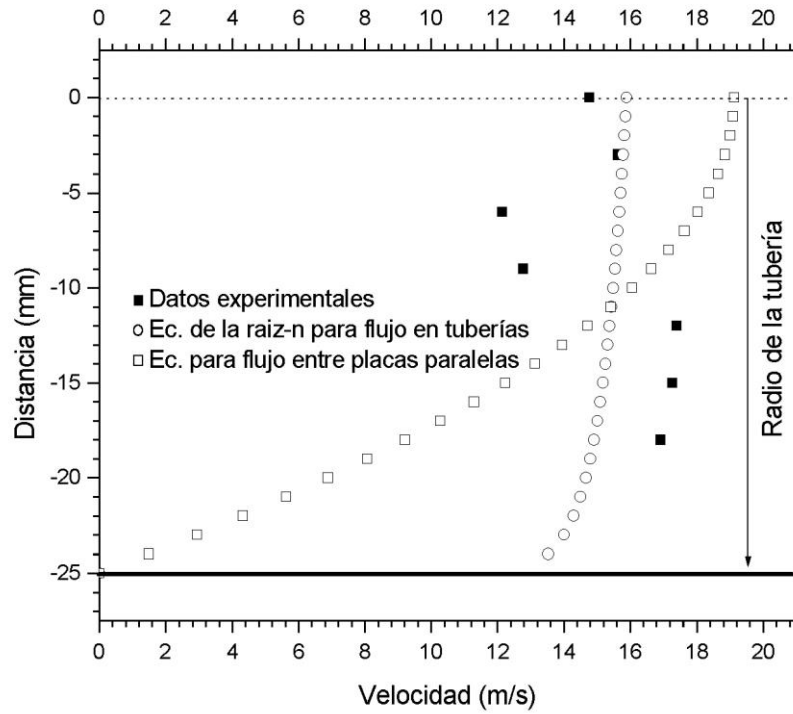


Fig. 4.21. Perfil de velocidades 13, parte inferior.

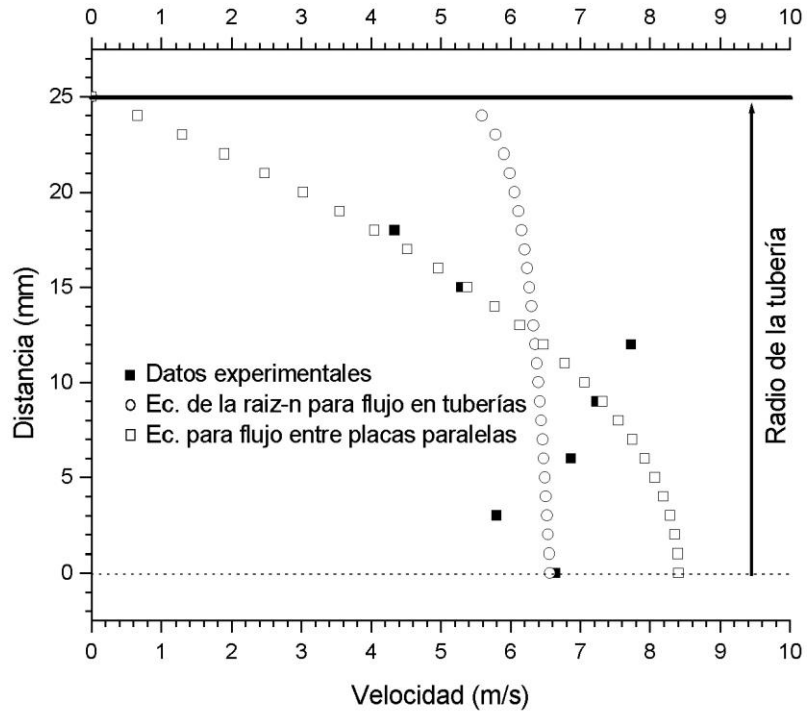


Fig. 4.22. Perfil de velocidades 14, parte superior.

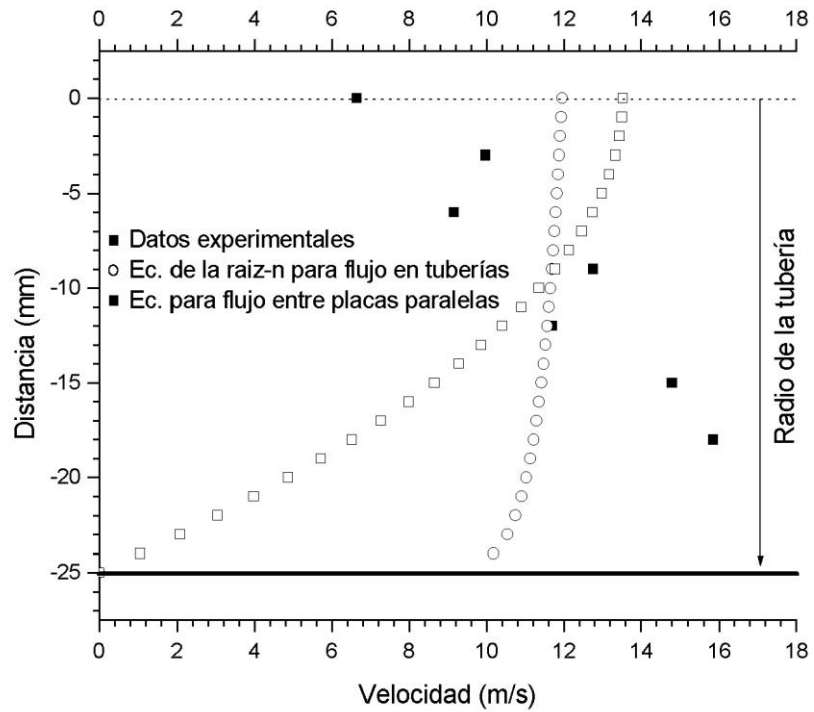


Fig. 4.23. Perfil de velocidades 14, parte inferior.

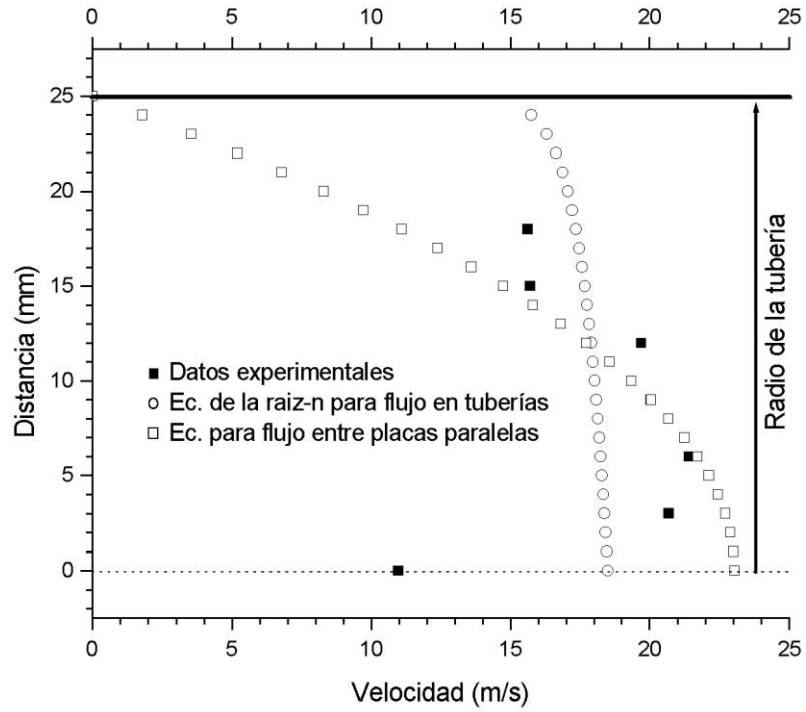


Fig. 4.24. Perfil de velocidades 15, parte superior.

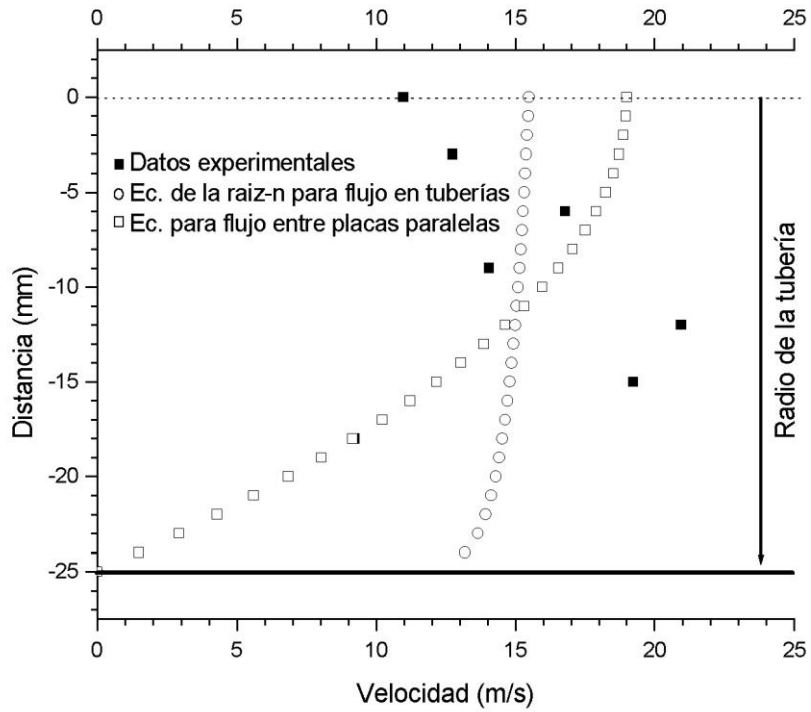


Fig. 4.25. Perfil de velocidades 15, parte inferior.

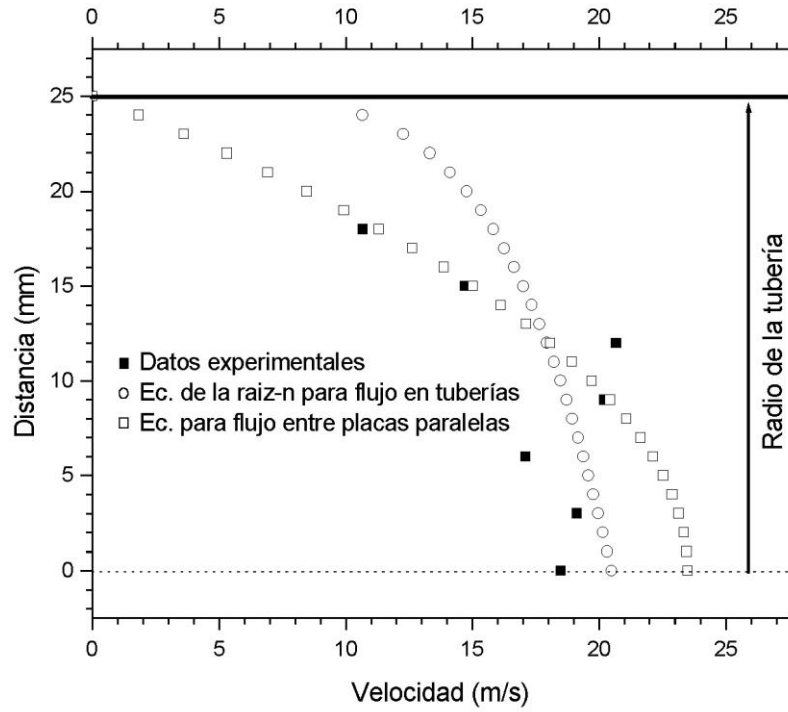


Fig. 4.26. Perfil de velocidades 16, parte superior.

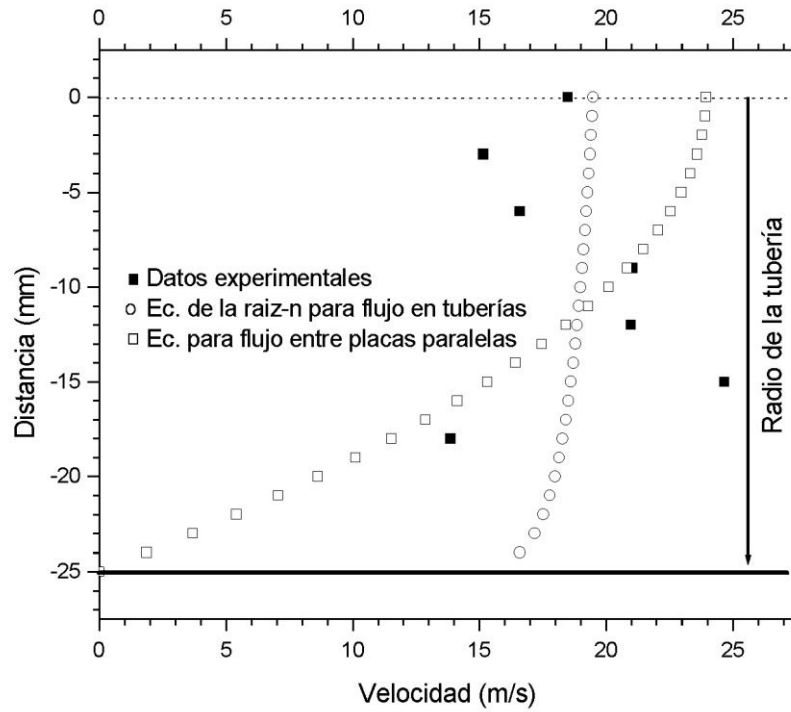


Fig. 4.27. Perfil de velocidades 16, parte inferior.

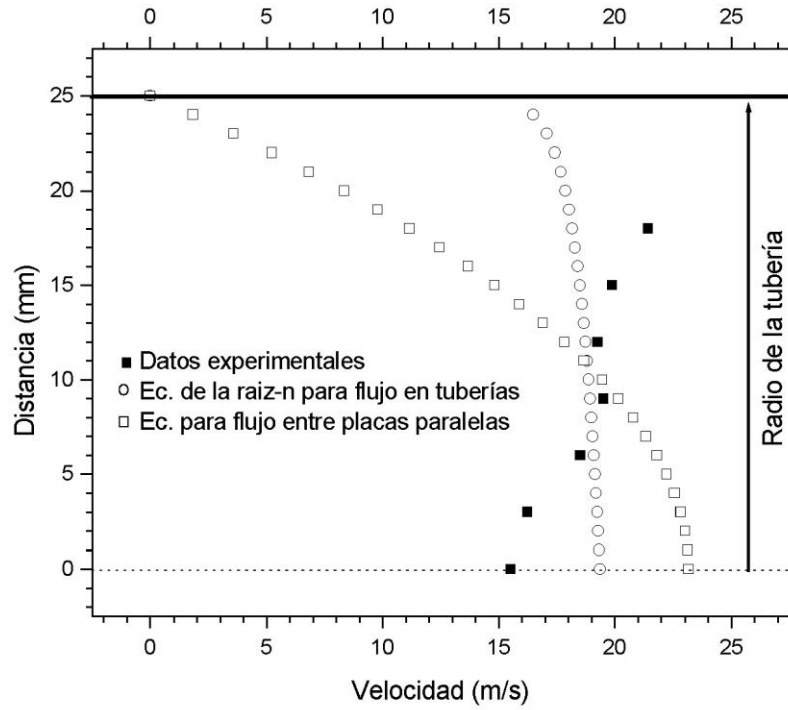


Fig. 4.28. Perfil de velocidades 17, parte superior.

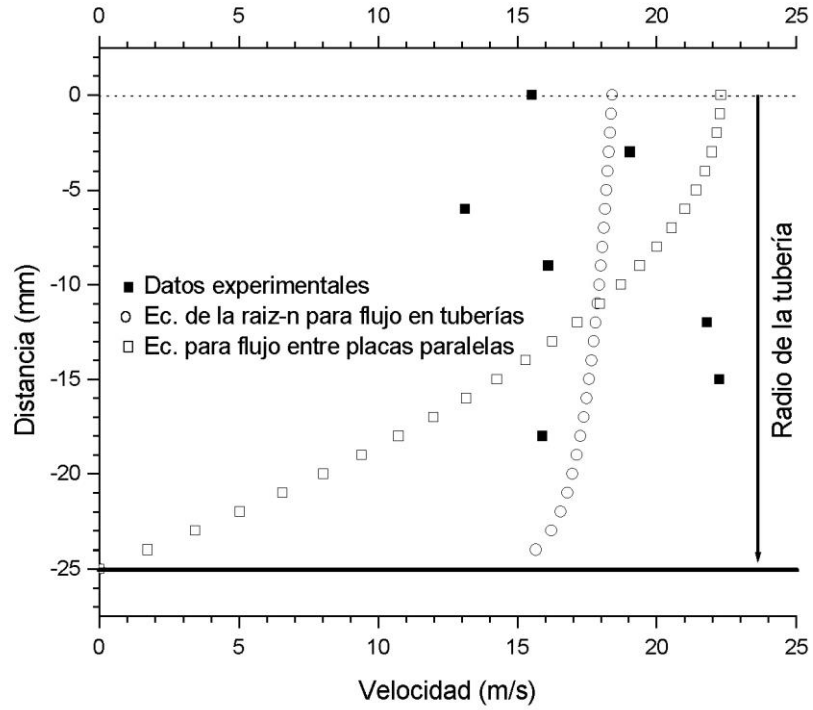


Fig. 4.29. Perfil de velocidades 17, parte Inferior.

IV.3 COMENTARIOS

Las condiciones para obtener resultados óptimos son: a) La utilización obligatoria de la navaja para controlar el voltaje de salida del fotodetector y b) Tener control de la temperatura del agua.

En los perfiles 1-5 se muestra lo que pasa si no se tienen controlados los aspectos anteriormente mencionados, ya que se pueden obtener valores incorrectos.

En los perfiles 8-11, en donde la temperatura se controló entre 10 °C y 12 °C, se observa que las velocidades de las líneas de flujo son menores comparadas con las de los perfiles 6-7 y 12-17, esto se debe a que, como se mencionó en el capítulo 2, la velocidad de propagación de la onda ultrasónica en el agua cambia con la temperatura.

En los perfiles 6-7 y 12-17, en donde la temperatura se conservó entre 28 y 29 °C y además se controló el voltaje de salida del fotodetector, se aprecia que los puntos experimentales se encuentran entre los límites satisfactorios.

Con estas pruebas se determinaron los parámetros que controlan la obtención de una onda estable que sirva de guía para determinar los tiempos de arribo.

De todos los resultados obtenidos, se determinó que el dispositivo experimental puede medir velocidades que van desde metros por segundo (en nuestros experimentos se lograron velocidades un poco menores a los 3 m/s), hasta velocidades cerca de la velocidad del sonido del medio (~ 1450 m/s para el agua) en que se propaga.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos. Primero se presenta el panorama general del fenómeno que se emplea para obtener los perfiles de velocidad resaltando los puntos importantes. Después se dan algunas conclusiones a las que podemos llegar con los resultados experimentales. Por último se discuten algunas consideraciones del trabajo realizado.

DISCUSIÓN

En este trabajo se ha estudiado el uso del rompimiento dieléctrico por medio del depósito de energía para generar ondas ultrasónicas y usarlas para inspeccionar los flujos. Esto se logra enfocando un pulso láser de cierta longitud de onda sobre un volumen pequeño dentro del medio, que en nuestro caso es agua fluyendo. La onda ultrasónica generada nos permite monitorear la velocidad de la línea de flujo en una cierta posición en la tubería; desplazando verticalmente en una sección transversal es posible obtener el perfil de velocidades del flujo confinado.

Del rompimiento dieléctrico en agua se caracterizó la energía necesaria para obtener solamente ondas ultrasónicas que no rebasaran la velocidad del sonido del medio y permanecer en el régimen elástico (ver capítulo III). Lográndose esto mediante la selección de la longitud de onda del láser, el ancho del pulso, la lente de enfoque y del cálculo de energía depositada en el medio. Las condicionantes principales fueron: que la tubería debe ser transparente a la longitud de onda del láser y que la distancia focal de la lente sea pequeña (Apéndice C); ya que entre más larga sea la distancia focal del lente se hace menos puntual y las ondas de presión ultrasónicas generadas se ensanchan; y al llegar a las líneas de monitoreo la deflexión se ve muy afectada y se tienen problemas para discernir el tiempo de arribo. Por otro lado, para garantizar el cálculo correcto de la velocidad a partir de los tiempos de arribo de la onda a los monitores, las distancias entre el punto de generación PA y las líneas de monitoreo deben estar localizadas dentro en un cierto intervalo (5-20 cm, capítulo III), el cual se establece conociendo el comportamiento de la velocidad del sonido (Figura 3.6) del medio ($C_0 \sim 1450$ m/s) y su escala de longitud ($R_0 \sim 0.00684$), en régimen estático (véase capítulo III).

CONCLUSIONES

Al retomar el estudio del uso de la fotoacústica para determinar la velocidad promedio de un flujo de los trabajos realizados por Tam y Zapka (1982), se ha logrado obtener los primeros perfiles de velocidad con la continuación de este método, lo que nos permite avanzar en esta área de investigación.

LAS VENTAJAS DE ESTE MÉTODO SON:

- No necesita introducir partículas extrañas al medio (como en la mayoría de los demás métodos), es decir; es no invasivo.
- Puede aplicarse para conocer el perfil de velocidades que presentan tanto líquidos como gases confinados (caracterizando previamente al fluido).
- Se puede conocer simultáneamente, aplicando cierta teoría, el perfil de temperaturas y el tamaño de las partículas si es que se tratase de flujos con carga. (Trabajo futuro).

DESVENTAJAS:

- Se necesita que una parte de la tubería sea transparente a la longitud de onda del pulso láser.
- La velocidad media del flujo a medir no debe rebasar la velocidad del sonido del medio. Sin embargo, para este caso, se podría medir dicho perfil generando ondas de choque, que se logran con la misma técnica descrita en esta tesis, por supuesto, saliéndose del régimen elástico y considerando otros modelos matemáticos.
- Se necesita que el dispositivo que adquiere las señales de deflexión tenga una resolución de al menos 0.5 ns (2 GHz).
- Se necesita un láser pulsado con la energía suficiente para generar las ondas ultrasónicas en el medio a estudiar.

OBSERVACIONES Y TRABAJO FUTURO

En principio, el tema de tesis surgió como parte de un proyecto que tiene la finalidad de diseñar y construir un velocímetro láser para flujos confinados por efecto fotoacústico. Que tiene las características de ser no invasivo, presentar mayor resolución y más fácil manejo, que los utilizados en la industria o en los laboratorios de investigación. Primero fue necesario demostrar en laboratorio el principio básico y la metodología a seguir para obtener los perfiles de velocidad. Durante este proceso se desarrollaron los siguientes tópicos:

Para comprender y establecer los alcances del efecto fotoacústico se llevo a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica, luego se revisaron diferentes metodologías para la observación del fenómeno en diferentes medios (sólidos, agua, aire, etc.). También, en forma paralela se estudiaron los fundamentos que rigen a los fluidos, y los modelos usados en ingeniería hidráulica para flujos confinados. Esto absorbió casi 6 meses.

Asimismo en este periodo se leyeron los manuales para el manejo correcto de los equipos como: Osciloscopio digital, sensores piezoeléctricos y de película, fotodiodos de alta resolución, láser de diodo, y el Láser pulsado de Nd:YAG con sus tres armónicos. Esto consumió alrededor de otros 4 meses.

El diseño del arreglo experimental y su montaje llevo alrededor de 2 meses más.

Las pruebas de la metodología con el arreglo experimental se realizaron en 6 meses aproximadamente.

Con el desarrollo de los tópicos anteriores consumió todo el tiempo que se tenía planeado para desarrollar la tesis de licenciatura. Ahora para obtener el velocímetro prototipo es necesario realizar lo siguiente:

- 1) Comprar o conseguir un láser de diodo pulsado (20 W), con un ancho de pulso alrededor de los ns, (No lo venden a particulares).
- 2) Diseño de un barredor por espejos, para hacer un barrido automático
- 3) Desarrollo de un dispositivo que adquiera las señales digitales y automáticamente las procese para su visualización en pantalla.

Lo anterior lo estamos desarrollando en el I. I., como parte de un proyecto de maestría.

Apéndice A

DIMENSIONES DE LAS TUBERÍAS UTILIZADAS

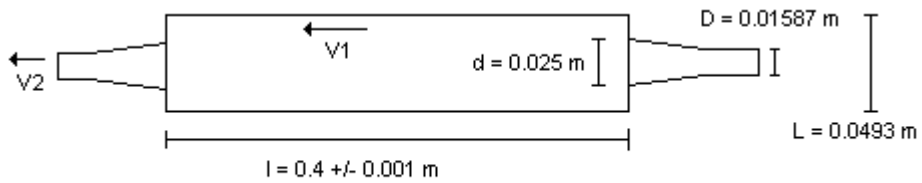


Fig. A1. Dimensiones de la tubería de acrílico de sección cuadrada.

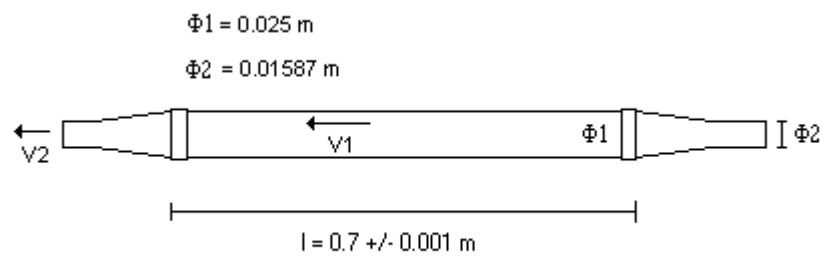


Fig. A2. Dimensiones de la tubería de Pirex de sección circular.

Apéndice B

TÉCNICA DE LA NAVAJA

La técnica de la navaja o “knife-edge”, se utiliza para limitar la cantidad de luz que recibe el fotodiodo y así poder tener la misma componente de directa en la señal para todos los haces.

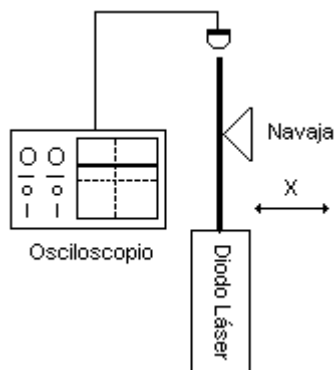


Fig. B1. Diodo Láser y navaja.

En la figura B1 se ejemplifica como es ajustada la intensidad de energía que llega al fotodiodo, esto se hace moviendo ligeramente la navaja, en las direcciones de “X” (hacia adelante y/o hacia atrás) observando en el osciloscopio hasta obtener el voltaje deseado.

Todos los haces deben ser ajustados al mismo voltaje de dc para que las señales tengan la misma referencia, además, el filo de las navajas debe ser colocado en la misma dirección (fig. B2) para cada haz con el fin de que ambas señales sean idénticas al momento de calibrar el equipo.

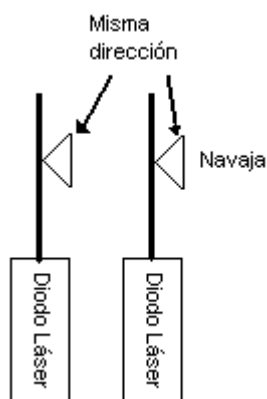


Fig. B2. Forma correcta de colocar las navajas, ambas en la misma dirección.

Apéndice C

CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL PUNTO DE ENFOQUE DE LA LENTE Y DE LA DENSIDAD DE ENERGÍA DEPOSITADA EN ÉL

La siguiente figura muestra los parámetros necesarios para el cálculo del diámetro del punto focal de una lente de tipo plano-convexa.

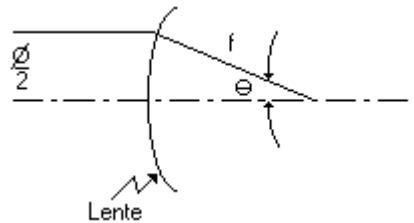


Fig. C1. Punto de enfoque de la lente.

Donde,

ϕ = Diámetro del haz incidente = 3 mm

f = Longitud focal efectiva de la lente = 75 mm

θ = Ángulo de enfoque o ángulo del cono de luz que sale de la lente.

Entonces, de la formula dada por el fabricante [19] se tiene que:

$$\frac{f}{\#} = \frac{f}{\phi}$$

Donde:

$\frac{f}{\#}$ = radio focal.

Sustituyendo los valores de f y ϕ , dicho número es igual a 25.

Sustituyendo este valor en la formula proporcionada para calcular el diámetro del punto de enfoque, en donde λ es la longitud de onda del haz que atraviesa la lente:

$$d = 2.44(\lambda)\left(\frac{f}{\#}\right)$$

se tiene que:

$$d = 32.45 \mu\text{m}$$

Ahora bien, la densidad de energía depositada se calculó a partir de:

$$\text{D.E.} = P / A$$

Donde A = area donde se deposita la energía = $\pi(d^2/4) = 0.837 \text{ nm}^2$, y P = a la potencia obtenida con la energía medida durante el tiempo en que se aplica un pulso = $3 \text{ mJ} / 22 \text{ ns} = 136.4 \text{ kW}$

Entonces, la Densidad de energía = $P / A = \mathbf{164.86 \times 10^{12} \text{ W/m}^2}$

Apéndice D

TABLAS DE LAS VELOCIDADES DE LAS LÍNEAS DE FLUJO OBTENIDAS EXPERIMENTALMENTE Y SU AJUSTE A MODELOS ANALÍTICOS QUE PREDICEN EL PERFIL DE VELOCIDADES EN TUBERÍAS

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	1106.444	1316.498	824.6117
1.5	1238.414	1340.187	1095.829
1.2	1106.809	1357.883	1317.735
0.9	1196.892	1372.054	1490.328
0.6	1174.66	1383.895	1613.609
0.3	1032.202	1394.076	1687.577
0	865.7615	1403.015	1712.234
0	865.7615	1306.274	1613.725
-0.3	1152.734	1297.951	1590.487
-0.6	1091.669	1288.472	1520.774
-0.9	941.6307	1277.448	1404.586
-1.2	904.5299	1264.254	1241.922
-1.5	937.9146	1247.778	1032.784
-1.8	957.8845	1225.723	777.1697
-2.5	0	0	0

Tabla D1. Velocidades del perfil 6.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	1106.444	1316.498	670.5571
1.5	1238.414	1340.187	891.1058
1.2	1106.809	1357.883	1071.555
0.9	1196.892	1372.054	1211.904
0.6	1174.66	1383.895	1312.153
0.3	1032.202	1394.076	1372.303
0	865.7615	1403.015	1392.353
0	865.7615	1306.274	1276.467
-0.3	1152.734	1297.951	1258.086
-0.6	1091.669	1288.472	1202.942
-0.9	941.6307	1277.448	1111.037
-1.2	904.5299	1264.254	982.369
-1.5	937.9146	1247.778	816.9389
-1.8	957.8845	1225.723	614.7465
-2.5	0	0	0

Tabla D2. Velocidades del perfil 7.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	425.4157	448.64942384	297.7672552
1.5	506.8096	475.32420837	395.7039936
1	472.0621	507.57926640	519.3614916
0.5	494.3314	531.78347326	593.5559904
0	583.4563	551.34976000	618.28749
0	583.4563	554.83518	653.722905
-0.5	558.9323	548.679191	627.5739888
-1	507.8584	540.843423	549.1272402
-1.5	446.634	529.9891635	418.3826592
-1.8	588.0537	520.6212515	314.832951
-2.5	0	0	0

Tabla D3. Velocidades del perfil 8.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	397.6105	434.7710273	334.6784349
1.5	454.7227	490.9407764	444.7553952
1	641.532	563.6583016	583.7414562
0.5	537.23	621.6947808	667.1330928
0	682.0559	670.79581	694.930305
0	682.0559	598.19218	679.930305
-0.5	591.9019	581.5778767	652.7330928
-1	444.2555	560.8374244	571.1414562
-1.5	472.9042	532.8551446	435.1553952
-1.8	563.6463	509.3966025	327.4544349
-2.5	0	0	0

Tabla D4. Velocidades del perfil 9.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	29.63709	218.0974893	225.5554143
1.5	272.099	276.8098933	299.7414144
1	446.505	362.9733345	393.4106064
0.5	468.887	439.9256799	449.6121216
0	433.5968	510.68195	468.34596
0	433.5968	441.99896	518.130975
-0.5	394.7637	434.7072386	497.405736
-1	481.1458	425.4838026	435.230019
-1.5	413.3254	412.8154206	331.603824
-1.8	380.7539	401.983656	249.5318776
-2.5	0	0	0

Tabla D5. Velocidades del perfil 10.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	539.7234	572.7395714	375.8712505
1.5	561.2343	602.4936409	499.4966784
1	673.5857	638.1995822	655.5893904
0.5	732.9293	664.8094284	749.2450176
0	620.0987	686.21134	780.46356
0	620.0987	700.72952	826.982295
-0.5	762.0933	692.9548089	793.9030032
-1	684.3014	683.0586196	694.6651278
-1.5	659.4441	669.3502242	529.2686688
-1.8	665.2866	657.5190125	398.2746733
-2.5	0	0	0

Tabla D6. Velocidades del perfil 11.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	466.3577	1312.2197	933.7311
1.5	415.0630	1335.8314	1240.8387
1.2	1207.2044	1353.4705	1492.1086
0.9	2242.2045	1367.5954	1687.5407
0.6	2202.9192	1379.3971	1827.1350
0.3	1581.1331	1389.5455	1910.8917
0	1169.2320	1398.4555	1938.8105
0	1169.2320	1098.6420	1344.6112
-0.3	958.2523	1087.3427	1325.2488
-0.6	787.0129	1074.5273	1267.1616
-0.9	1220.3638	1059.6970	1170.3496
-1.2	1210.2251	1042.0511	1034.8127
-1.5	1002.9586	1020.1740	860.5511
-1.8	825.4076	991.1676	647.5647
-2.5	0	0	0

Tabla D7. Velocidades del perfil 12.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	1454.3213	1454.6550	938.4782
1.5	1134.7975	1480.8297	1247.1471
1.2	1473.0822	1500.3835	1499.6944
0.9	1860.4370	1516.0416	1696.1201
0.6	1523.8289	1529.1243	1836.4241
0.3	1465.6875	1540.3742	1920.6065
0	1476.8524	1550.2513	1948.6674
0	1476.8524	1589.6314	1912.3677
-0.3	1563.4486	1579.5034	1884.8296
-0.6	1214.3089	1567.9677	1802.2153
-0.9	1277.3023	1554.5527	1664.5248
-1.2	1741.3060	1538.4968	1471.7581
-1.5	1727.1455	1518.4463	1223.9153
-1.8	1692.5487	1491.6068	920.9963
-2.5	0	0	0

Tabla D8. Velocidades del perfil 13.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	433.6872	616.1495	404.9417
1.5	529.5360	627.2363	538.1286
1.2	772.7702	635.5188	647.0996
0.9	723.4026	642.1511	731.8548
0.6	686.7433	647.6925	792.3943
0.3	580.0316	652.4577	828.7180
0	664.7793	656.6413	840.8259
0	664.7793	1195.7782	1352.5780
-0.3	997.4496	1188.1595	1333.1008
-0.6	915.3096	1179.4820	1274.6695
-0.9	1275.4787	1169.3907	1177.2839
-1.2	1170.4683	1157.3129	1040.9440
-1.5	1480.2060	1142.2302	865.6499
-1.8	1585.2928	1122.0405	651.4015
-2.5	0	0	0

Tabla D9. Velocidades del perfil 14.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	1561.8723	1735.9912	1109.2340
1.5	1571.0256	1767.2282	1474.0651
1.2	1970.3298	1790.5638	1772.5633
0.9	2003.2219	1809.2502	2004.7285
0.6	2138.6777	1824.8632	2170.5608
0.3	2068.9732	1838.2889	2270.0602
0	1097.6280	1850.0763	2303.2267
0	1097.6280	1549.1588	1900.3961
-0.3	1274.7018	1539.2886	1873.0304
-0.6	1678.8214	1528.0466	1790.9333
-0.9	1405.1840	1514.9731	1654.1048
-1.2	2093.8530	1499.3261	1462.5449
-1.5	1924.1781	1479.7860	1216.2535
-1.8	923.8988	1453.6298	915.2308
-2.5	0	0	0

Tabla D10. Velocidades del perfil 15.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	1067.4331	1582.2850	1130.7662
1.5	1471.6063	1701.2676	1502.6794
1.2	2068.0214	1794.4635	1806.9719
0.9	2021.3867	1871.8257	2043.6439
0.6	1708.9385	1938.3699	2212.6954
0.3	1911.8228	1997.0047	2314.1262
0	1849.9171	2049.5780	2347.9365
0	1849.9171	1949.2214	2393.0689
-0.3	1515.4255	1936.8023	2358.6087
-0.6	1659.7735	1922.6571	2255.2281
-0.9	2106.6349	1906.2074	2082.9271
-1.2	2098.9452	1886.5196	1841.7058
-1.5	2465.4812	1861.9335	1531.5641
-1.8	1385.5536	1829.0226	1152.5020
-2.5	0	0	0

Tabla D11. Velocidades del perfil 16.

Distancia [cm]	Ec. de Tam [cm/s]	Ec. Raíz-n [cm/s]	Ec. Placas Paralelas [cm/s]
2.5	0	0	0
1.8	2142.2761	1817.1496	1115.3189
1.5	1989.4605	1849.8469	1482.1514
1.2	1925.8440	1874.2735	1782.2870
0.9	1951.8371	1893.8335	2015.7259
0.6	1851.1004	1910.1764	2182.4679
0.3	1623.6076	1924.2297	2282.5131
0	1552.0188	1936.5682	2315.8615
0	1552.0188	1840.6423	2228.8699
-0.3	1904.7051	1828.9151	2196.7742
-0.6	1312.0619	1815.5578	2100.4870
-0.9	1611.1010	1800.0244	1940.0084
-1.2	2179.1175	1781.4333	1715.3383
-1.5	2223.0853	1758.2167	1426.4768
-1.8	1589.4436	1727.1390	1073.4238
-2.5	0	0	0

Tabla D12. Velocidades del perfil 17.

Apéndice E

FUENTE DE 5 V DC

Se construyeron dos fuentes de voltaje de DC, para cada uno de los diodos láser, de acuerdo con los datos proporcionados por el fabricante en la hoja de especificaciones del diodo láser. Dicha fuente debe suministrar 5V a la salida y evitar que la corriente sobrepase los 60 mA. El diagrama del circuito diseñado se muestra en la figura E1.

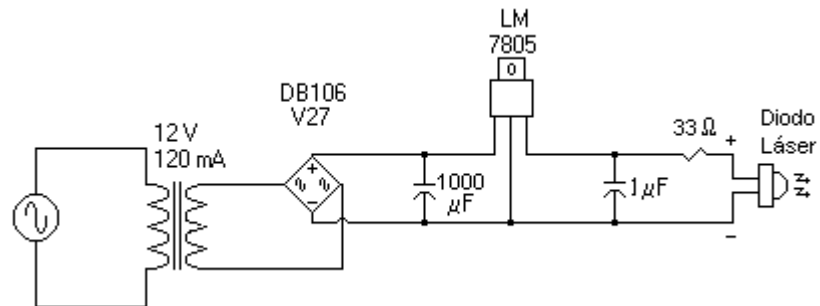


Fig. E1. Circuito de la fuente de 5V a 60mA.

Apéndice F

HOJAS DE ESPECIFICACIONES

HIGH SPEED PIN PHOTODIODES

SPECIFICATIONS

Responsivity: 0.50 A/W min., 0.62 A/W typ. @ 900nm

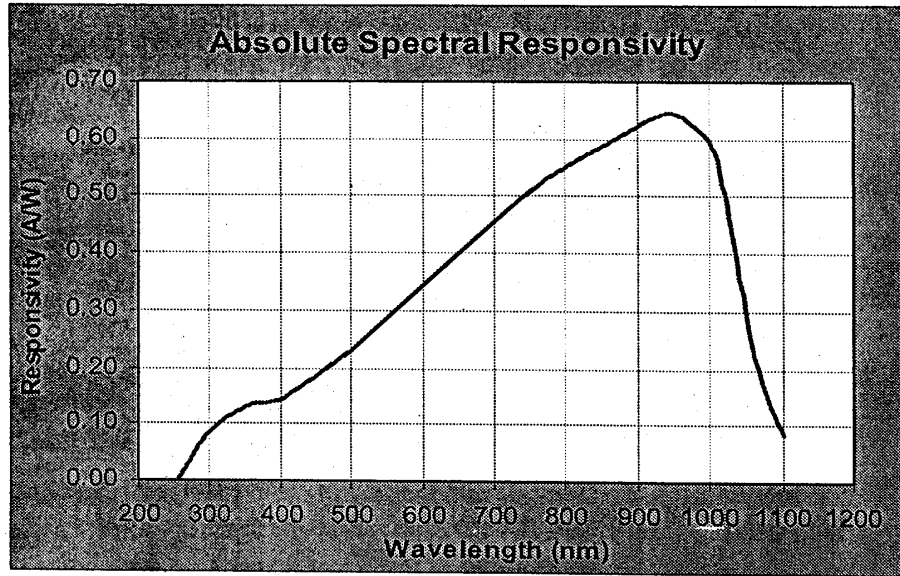
Part Number	Total Area (mm ²)	Active Area (in)	Dark Current ¹ at 50V		Breakdown Voltage ² at 10 μ A Typ. (V)	Capacitance ³ Typ.		NEP ⁴ Typ. (W/√Hz)	Max Linear Current ⁵ Typ. (mA)	Response Time ⁶ at 60V Typ. (ns)
			Typ. (nA)	Max. (nA)		at 0V (pF)	at 50V (pF)			
SD 020-11-33-211	0.20	0.020 (dia.)	0.5	2.0	75	2.1	0.3	2.4x10 ⁻¹⁴	0.02	1
SD 041-11-33-211	0.89	0.040 x 0.033	2.0	8.0	75	5.6	0.5	4.8x10 ⁻¹⁴	0.08	2
SD 076-11-31-211	2.91	0.105 x 0.043	8.0	30	75	17	2.5	1.0x10 ⁻¹³	0.29	2
SD 100-11-31-221	5.1	0.100 (dia.)	12	50	75	28	3.5	1.3x10 ⁻¹³	0.51	2
SD 172-11-31-221	15	0.185 x 0.125	35	147	75	82	10	2.0x10 ⁻¹³	1.5	2
SD 201-11-31-241	20.3	0.200 (dia.)	50	200	75	110	11	3.0x10 ⁻¹³	2.03	2
SD 290-11-31-241	42.6	0.300 x 0.220	110	425	75	235	22	3.8x10 ⁻¹³	4.26	3

* All values at 23°C

- Dark Current varies with temperature as follows; for T≠23°C, $I_{0T} = I_{023} \cdot 1.09^{\Delta T}$, where $\Delta T = (T - 23)$ and I_{023} is the dark current at 23°C.
- Typical values listed. Minimum value shall be 50V.
- Typical values listed. Maximum value shall be 20% higher than the typical.
- Test conditions are $V_b = -50V$, and 950 nm.
- In photovoltaic mode. Maximum linear current specifies the level at which the output current characteristic deviates more than 10% from the straight line. The short circuit current saturates at approximately 10 times this level.
- Response Time (transition time between 10% and 90% of the output signal amplitude) measured at 670 nm with a 50 Ω load. Shorter wavelengths will result in faster rise and fall times.

Storage and Operating Temperature Range for all photodiodes is -40°C to 110°C

Hoja 1 de especificación del fotodiodo SD-100-11-31-221.



Hoja 2 de especificación del fotodiodo SD-100-11-31-221.

Emitters/Detectors Infrared Emitting Diodes

Motorola's infrared emitting diodes are made by the liquid phase epitaxial process for long life and stability. They provide high power output and quick response at 660 nm, 850 nm or 940 nm with low input drive current.

Table 25. Infrared Emitting Diodes

Device	Power Output		Emission Angle Typ	Peak Emission Wavelength nm Typ	Forward Voltage		Case/ Style
	μ W Typ	I_F mA			@ I_F Max	@ I_F mA	
<i>MLED91</i>	2500	50	60°	940	1.8	50	422A-01/1
<i>MLED96</i>	4000	100	60°	660	2.2	60	422A-01/4
<i>MLED97</i>	2500	100	60°	850	2	100	422A-01/4
<i>MLED91</i>	16000	100	60°	940	1.7	100	279B-01/1
<i>MLED930</i>	650	100	30°	940	1.5	50	209-01/1

Silicon Photodetectors

A variety of silicon photodetectors are available, varying from simple PIN diodes to complex, single chip 400 volt triac drivers. They offer choices of viewing angle and size in either economical plastic cases or rugged, hermetic metal cans. They are spectrally matched for use with Motorola infrared emitting diodes.

Table 26. PIN Photodiodes - Response Time = 1 ns Typ

Device	Light Current @ $V_R = 20$ V, $H = 5$ mW/cm ² μ A	Dark Current @ $V_R = 20$ V nA (Max)	Case/ Style
MRD500	9	2	209-02/1
MRD510	2	2	210-01/1
<i>MRD921</i>	4	10	422A-01/1
<i>MRD821</i>	250	60	381-01/1

Table 27. Phototransistors

Device	Light Current @ $V_{CC} = 20$, $H = 5$ mW/cm ² mA (Typ)	$V_{(BR)CEO}$ Volts (Min)	t_r/t_f @ $V_{CC} = 20$, $I_L = 1000$ μ A μ s (Typ)	Case/ Style
MRD310	3.5	50	2/2.5	82-05/1
MRD300	8	50	2/2.5	
MRD3050	0.1 Min	30	2/2.5	
MRD3056	2 Min	30	2/2.5	
t_{on}/t_{off} @ $V_{CC} = 5$ V				
<i>MRD901</i>	0.5	30	10/60	422A-01/2

All case 422 and 422A devices are available in Tape and Reel format. Add RLRE suffix to the part number; e.g. MRD901RLRE. (See Tape and Reel Specifications Section for more information)

Devices listed in bold, italic are Motorola preferred devices.

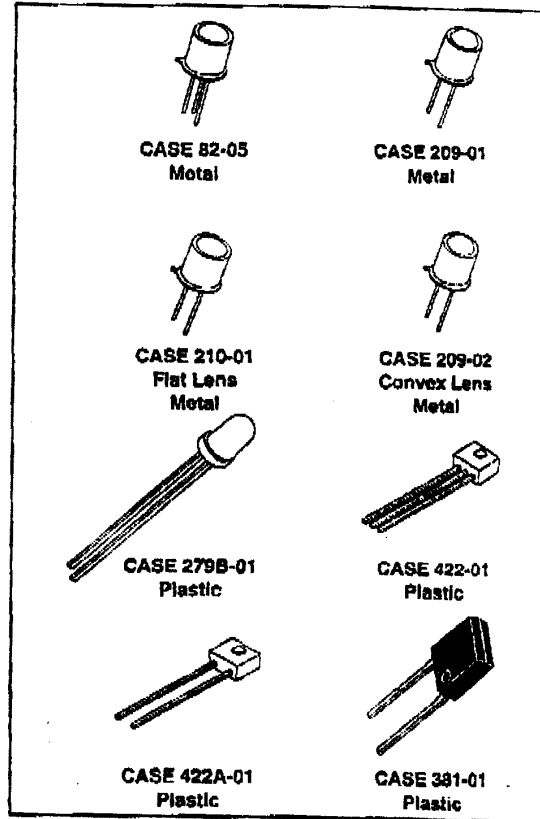


Table 28. Photodarlingtontons

Device	Light Current @ $V_{CC} = 5$, $H = 0.5$ mW/cm ² mA (Typ)	$V_{(BR)CEO}$ Volts (Min)	t_r/t_f @ $V_{CC} = 5$ V μ s (Typ)	Case/ Style
MRD370	10	40	15/40	82
MRD360	20	40	15/65	
<i>MRD911</i>	25	60	125/150	422

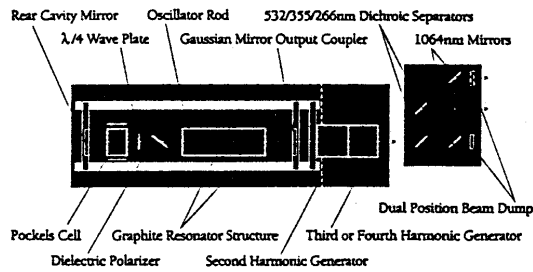
Table 29. Photo Triac Drivers

Device	HFT mW/cm ² Max	$I_T(RMS)$ mA Max	V_{ORM} Volts Peak Min	I_{CRM} nA Typ
MRD3010	5	100	250	10

Table 30. Photo Schmitt Triggers

Device	Threshold Current mA		$I_F(off)$ / $I_F(on)$ Typ	V_{CC} Volts	t_r/t_f μ s Typ	Case/ Style
	ON Max	OFF Min				
<i>MRD850</i>	20	1	0.75	3-15	0.1	42
MRD5009	20	1	0.75	3-15	0.1	82

Optical Layout



Specifications

Series	10	20	Series	10	20
Repetition Rate (Hz)	10	20	Energy stability ⁵ (±%)		
Energy (mj)			1064nm	2.5	2.5
1064nm	320	300	532nm	3.5	3.5
532nm	150	125	355nm	4.0	4.0
355nm	55	45	266nm	10	10
266nm	40	30	Power drift ⁶ (±%)		
Pulsewidth ¹ (ns)			1064nm	3.0	3.0
1064nm	5-7	5-7	532nm	5.0	5.0
532nm	4-6	4-6	355nm	5.0	5.0
355nm	4-6	4-6	Beam spatial profile (fit to Gaussian) ⁷		
266nm	4-6	4-6	Near field (1m)	0.70	0.70
Linewidth ² (cm ⁻¹)			Far field (∞)	0.95	0.95
no options	1.0	1.0	Max. deviation from fitted Gaussian ⁸ (±%)		
LNE (10% energy reduction)	0.05	NA	Near field (<1m)	30	30
Divergence ³ (mrads)	0.6	0.6	Service requirements		
Rod diameter (mm)	6	6	Power 220/240V, single ∅	12A	12A
Beam pointing stability (μrads)	250	250	Weight (lbs)		
Jitter ⁴ (±ns)	0.5	0.5	Optical head	35	35
			Power supply (with water)	150	150

(All specifications at 1064nm unless otherwise noted)

1 Full Width Half Maximum.

4 With respect to external trigger.

7 A least squares fit to a Gaussian profile. A perfect fit would have a coefficient of 1.

2 Full Width Half Maximum (1cm⁻¹=30GHz).

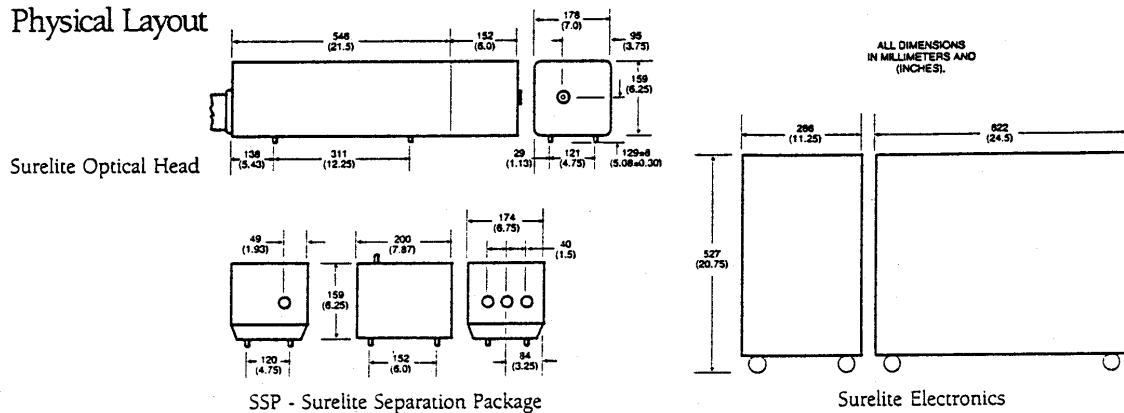
5 Shot-to-shot for 99.9% of pulses.

8 At beam center.

3 Full angle for 86% energy.

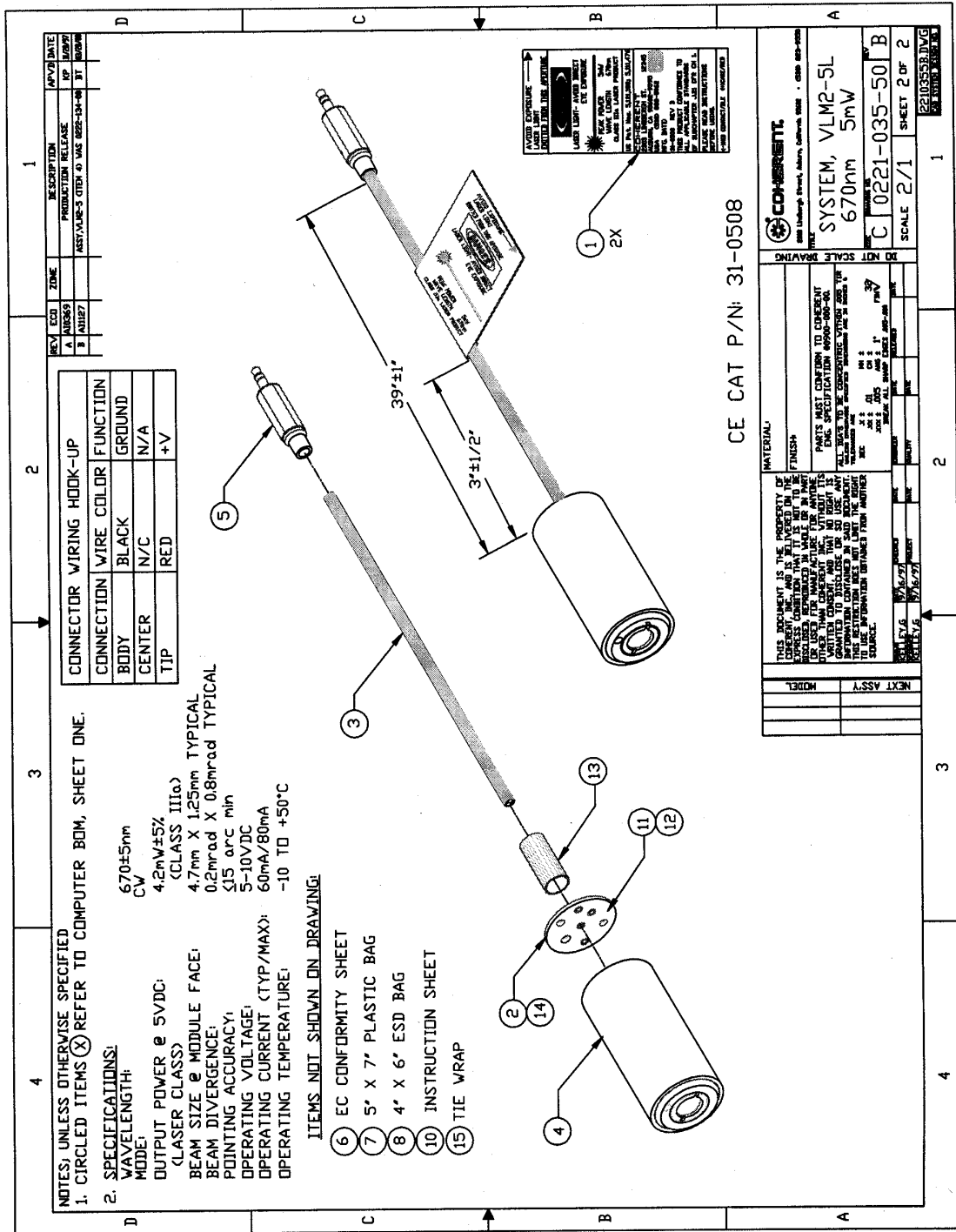
6 From average for 8 hours.

Physical Layout



Continuum, 3150 Central Expressway, Santa Clara, CA 95051 Tel: 408 727-3240, FAX: 408 727-3550

Hoja de especificación del láser Q-switched Nd:YAG.



Hoja de especificación del diodo láser.

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1.1. Arreglo para el sistema de dos haces.
Fig. 1.2. Pulsos producidos por una sola partícula.
Fig. 1.3. Arreglo para el sistema de haz de referencia.
Fig. 1.4. Arreglo para el sistema heterodino diferencial.
Fig. 1.5. Arreglo para el sistema heterodino simétrico.
Fig. 1.6. Arreglo experimental para SRGS.
Fig. 1.7. Arreglo experimental para CARS.
Fig. 2.1. Arreglo experimental para el cálculo de la velocidad con el modelo de Zapka y Tam.
Fig. 2.2. Flujo entre placas paralelas.
Fig. 2.3. Perfil de velocidades obtenido con la ecuación de la raíz enésima.
Fig. 2.4. (a) Tubería cuadrada con cambio abrupto en su sección transversal, (b) ejemplo del perfil de velocidades que se obtendría para una tubería cuadrada utilizando un método numérico [18].
Fig. 3.1. Fotografía del Nd:YAG Continuum, modelo Surelite I.
Fig. 3.2. Fotodiodo MRD500 con base.
Fig. 3.3. Fotodiodo de LaserOptics S.A.
Fig. 3.4. Lente con longitud focal de 75 mm.
Fig. 3.5. Diodo láser de Coherent Inc., modelo 0221-035-50.
Fig. 3.6. Osciloscopio Tektronix, modelo TDS540A.
Fig. 3.7. Bomba F&Q Pumps, modelo HT300, de 3/4 HP.
Fig. 3.8. Haz láser defletrado incidiendo en un fotodetector.
Fig. 3.9. Ejemplo de señal de deflexión.
Fig. 3.10. Arreglo experimental para el registro fotoacústico del perfil de velocidades en una tubería cualquiera con agua.
Fig. 3.11. Corte transversal de la tubería.
Fig. 3.12. Fotografía del arreglo experimental con tubería cuadrada.
Fig. 3.13. Arreglo experimental para la caracterización de las ondas generadas en agua.
Fig. 3.14. (a) Velocidades de la onda de choque en las posiciones $-X$, X , Y en el intervalo (5 cm, 10 cm), (b) Posiciones respecto al pulso PA de $-X$, X , Y .
Fig. 3.15. Variación del desplazamiento de la ecuación $R(t) = C_0 t [1 + R_0 / (C_0 t)]^{1/2}$, desde la fuente acústica 0, para obtener la relación entre R y el tiempo de arribo t , en un medio estático.
Fig. 3.16. Tiempo de arribo de la señal característica defletrada.
Fig. 3.17. (a) Barrido de la tubería tomado a intervalos de 3 mm con la dirección del pulso PA en el sentido del flujo (para L1 a 11 cm de 0), (b) Barrido de la tubería tomado a intervalos de 5 mm con la dirección del pulso PA en contra del flujo (para L2 a 11 cm de 0).
Fig. 3.18. Perfiles de velocidades obtenidos a partir de tres modelos matemáticos diferentes.
Fig. 4.1. Perfil de velocidades 1.
Fig. 4.2. Perfil de velocidades 2.
Fig. 4.3. Perfil de velocidades 3.
Fig. 4.4. Perfil de velocidades 4.
Fig. 4.5. Perfil de velocidades 5.
Fig. 4.6. Perfil de velocidades 8, parte superior.
Fig. 4.7. Perfil de velocidades 8, parte inferior.

Fig. 4.8. Perfil de velocidades 9, parte superior.
 Fig. 4.9. Perfil de velocidades 9, parte inferior.
 Fig. 4.10. Perfil de velocidades 10, parte superior.
 Fig. 4.11. Perfil de velocidades 10, parte inferior.
 Fig. 4.12. Perfil de velocidades 11, parte superior.
 Fig. 4.13. Perfil de velocidades 11, parte inferior.
 Fig. 4.14. Perfil de velocidades 6, parte superior.
 Fig. 4.15. Perfil de velocidades 6, parte inferior.
 Fig. 4.16. Perfil de velocidades 7, parte superior.
 Fig. 4.17. Perfil de velocidades 7, parte inferior.
 Fig. 4.18. Perfil de velocidades 12, parte superior.
 Fig. 4.19. Perfil de velocidades 12, parte inferior.
 Fig. 4.20. Perfil de velocidades 13, parte superior.
 Fig. 4.21. Perfil de velocidades 13, parte inferior.
 Fig. 4.22. Perfil de velocidades 14, parte superior.
 Fig. 4.23. Perfil de velocidades 14, parte inferior.
 Fig. 4.24. Perfil de velocidades 15, parte superior.
 Fig. 4.25. Perfil de velocidades 15, parte inferior.
 Fig. 4.26. Perfil de velocidades 16, parte superior.
 Fig. 4.27. Perfil de velocidades 16, parte inferior.
 Fig. 4.28. Perfil de velocidades 17, parte superior.
 Fig. 4.29. Perfil de velocidades 17, parte inferior.
 Fig. A1. Dimensiones de la tubería empleada.
 Fig. A2. Dimensiones de la tubería de acrílico de sección cuadrada.
 Fig. B1. Diodo Láser y navaja.
 Fig. B2. Forma correcta de colocar las navajas.
 Fig. C1. Punto de enfoque de la lente.
 Fig. E1. Circuito de la fuente de 5V a 60mA.

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Tiempos de arribo promedio a diferentes distancias en tubería de acrílico con medio estático.
 Tabla 4.1. Nombre de los archivos de las señales adquiridas. Perfiles 1-17.
 Tabla 4.2. Velocidad promedio de las líneas de flujo en los perfiles 8-11.
 Tabla 4.3. Velocidad promedio de las líneas de flujo en los perfiles 6-7 y 12-17.
 Tabla D1. Velocidades del perfil 6.
 Tabla D2. Velocidades del perfil 7.
 Tabla D3. Velocidades del perfil 8.
 Tabla D4. Velocidades del perfil 9.
 Tabla D5. Velocidades del perfil 10.
 Tabla D6. Velocidades del perfil 11.
 Tabla D7. Velocidades del perfil 12.
 Tabla D8. Velocidades del perfil 13.
 Tabla D9. Velocidades del perfil 14.
 Tabla D10. Velocidades del perfil 15.
 Tabla D11. Velocidades del perfil 16.
 Tabla D12. Velocidades del perfil 17.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

1. W. Zapka, A.C. Tam. "Noncontact optoacoustic determination of glass flow velocity and temperature simultaneously", *Appl. Phys. Lett.*, 40(12), pp.1015-1017, 1982.
2. W. Zapka, A.C. Tam. "Photoacoustic pulse generation and probe-beam deflection for ultrasonic velocity measurements in liquids", *Appl. Phys. Lett.*, 40(4), pp.310-312, 1982.
3. Durrani, Tariq S. et al. "Laser systems in flow measurement", Plenum Press, 1977, New York.
4. Christie, J., Burns, J.G. y Ross M.A.S. "Electro-optic Systems in Flow Measurements", Universidad de Southampton, 1972, Southampton.
5. Fage, A., y Townend, H.C.H., "An examination of turbulent flow with an ultramicroscope", *Proc. R. Soc. A.*, (132), pp. 656-677, 1932.
6. Yeh, Y., y Cummins, H. "Localized fluid measurements with an He-Ne laser spectrometer", *Appl. Phys. Lett. A*, p.p. 176-178, 1964.
7. Van de Hulst, H.C. "Light scattering by small particles", Wiley, 1957, New York.
8. Thompson, D.H. "A tracer- particle fluid velocity meter incorporating a laser", *J. Phys. E*, (1), p.p. 929-932, 1968.
9. Tocho, J.O. "El láser en la medición de velocidades". Láser y óptica en la Ingeniería, Centro de Investigaciones Ópticas, 1989.
10. Herring G.C. et al. "Observation and measurement of molecular flow using stimulated Raman gain spectroscopy", *IEEE J. Quantum Electro. QE-17(10)*, p.p. 1975-1976, 1981.
11. Gustafson, E.K. et al. "CARS Measurement of velocity in a supersonic jet", *IEEE J. Quantum Electro. QE-17(12)*, p.p. 2258-2259, 1981.
12. M. Villagrán-Muniz et al., "Deflectometría láser para la medida de ondas de choque"
13. A.C. Tam, "Applications of photoacoustic sensing techniques", *Rev. of Mod. Phys.*, 58(2), p.p. 381-430, 1986.
14. G.E. Pozos Jiménez, "Determinación del módulo de Young mediante fotoacústica", tesis de licenciatura para obtener el grado de Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F., 2000.
15. A.C. Tam y K.N. Patel, "Optical absorptions of light and heavy water by laser optoacoustic spectroscopy", *Applied Optics*, 18(19), p.p. 3348-3358, 1979.
16. Potter, Merle C. et al. "Mecánica de Fluidos", Pearson Education. 2ª edición 1998, México.
17. J. Vennard, R. Street. "Elementary Fluid Mechanics", John Wiley & Sons. 5ª edición 1976, Canada.
18. D. Elkaim, M. Reggio y R. Camarero, "Simulating of two-dimensional turbulent flow by using the κ - ϵ model and the vorticity-streamfunction formulation", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, (14), p.p. 961-980, 1992
19. Manual de productos 1995/96 de la empresa Melles Griot.