

01190



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERIA**

**“OBTENCION DEL CAMPO DE  
VELOCIDADES EN EL MODELO  
DEL MULTIPLE DE ADMISION  
DE UN MOTOR DE COMBUSTION  
INTERNA”**

**TEMA DE TESIS  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERIA PRESENTA:**

**DAMAZO NORBERTO JIMENEZ ANTONIO**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. FRANCISCO SOLORIO ORDAZ**

**MEXICO, D.F., JUNIO DE 2004**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **AGRADECIMIENTOS**

A José Alberto Jiménez, yo se cuanto sufriste por tratar de ver la luz, que Dios te bendiga siempre, estés donde estés.

A mi esposa Cecilia Santiago Matus y a mis hijas Dany y Xhunaxhi, por todo lo que han pasado.

A mis padres y hermanos, quienes siempre me apoyaron.

A la memoria de mis dos hermanos Melchor (†2002) y Selene Jiménez (†2003), guira' dxhi nu tu ndani ladxhidua' di', ti reda silu' naa' ca guendanayeche bitídinu yoo' dxhi scuidila'canu, ca dxhi xetu guiba', qui ñanda ñabe latu xhixha ti gucana' xhata laxhidua, ne deyana cayaca xhilaxe ti ma quiguinitu ne naa' (Estarán siempre en mi corazón, guardo gratos recuerdos de los momentos felices de nuestra niñez, y en aquellos tiempos de tristezas mis labios enmudecieron al intentar decirles adios y desde entonces mi corazón esta triste).

A Leo y Adriana, por todo el apoyo que me han dado.

Al Dr. Francisco Solorio Ordaz, por la dirección de este trabajo, mil gracias.

A mi comité doctoral:

Dr. Francisco Solorio Ordaz

Dr. Jaime Cervantes de Gortari

Dr. Federico Méndez Lavielle

Dr. Rogelio González Oropeza

Dr. Alejandro Romero López

Dr. Alejandro Rodríguez Valdez

Dr. Jorge Carrera Bolaños

A todos los compañeros del departamento de Termofluidos, en especial a los señores laboratoristas, C. Daniel Ramírez Andrade, C. Fernando Galán, Cipriano Ponce y la secretaria del departamento Sra. Concepción Cortéz Flores, por todo el apoyo que dieron en este proyecto.

Un agradecimiento especial al C. Daniel Ramírez Andrade, jefe del laboratorio, por la construcción de la base y soporte del motor de combustión interna, utilizado en este proyecto. Así mismo un agradecimiento especial al Ing. Armando Maldonado por la donación de dicho motor.

Agradezco profundamente el apoyo económico recibido por la DGEP mediante una beca para mis estudios de posgrado.

Al Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de ingeniería, UNAM, mil gracias por todo el apoyo brindado en mis estudios y en el desarrollo del proyecto

Un agradecimiento a la DGAPA por el apoyo recibido dentro del programa PAPIIT IN105798, para el desarrollo del proyecto.

POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU

(RUNI CA LI ZAA' STINE SA NI' BISI)

Damazo Norberto Jiménez Antonio

# INDICE

	PAGINA
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
NOMENCLATURA	vi
<b>I.- INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1.- Objetivo de la investigación	1
1.2.- Importancia y justificación	1
1.3.- Motivación y fundamento	2
<b>II.- ANTECEDENTES</b>	<b>7</b>
2.1.- Estudios experimentales	7
2.2.- Estudios Numéricos	13
2.3.- Comentario final	15
<b>III.- DESCRIPCION DEL MODELO Y DEL EQUIPO E INSTRUMENTACION</b>	<b>16</b>
3.1.- Modelo del múltiple de admisión	16
3.2.- Equipo e instrumental	17
<b>IV.- PRUEBAS PRELIMINARES</b>	<b>22</b>
4.1.- Mediciones en chorro libres	22
4.2.- Mediciones en un conducto rectangular	24

<b>V.- RESULTADOS DE LAS MEDICIONES EN EL PLENUM</b>	<b>34</b>
<b>5.1.- Mediciones de velocidades en la entrada del plenum</b>	<b>35</b>
<b>5.2.- Mediciones de velocidades en el plenum</b>	<b>39</b>
<b>5.3.- Campo vectorial de velocidades en el plano central del plenum.</b>	<b>51</b>
<b>5.4.- Comentario final</b>	<b>61</b>
<b>VI.- CONCLUSIONES</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>65</b>

## **RESUMEN**

En este proyecto doctoral se obtiene experimentalmente el campo de velocidades no estacionario en el modelo de un sistema de admisión de un motor de combustión interna, con el objeto de comprender mejor el flujo de aire dentro del múltiple de admisión. Las mediciones se hacen mediante un Anemómetro Láser Doppler (ALD) de Helio-Neon de un solo color. El modelo en cuestión se compone de un plenum con tres corredores o derivaciones que se conectan una a la vez a la admisión de un motor de combustión interna de 4 cilindros, arrastrado por un motor eléctrico de 1 Hp de potencia. El motor de combustión opera con un solo cilindro en compresión y los demás se abren a la atmósfera.

Se obtienen las componentes de la velocidad en dos direcciones, en una malla de 133 puntos localizados en el plano central del plenum, cada vez que un corredor se conecta a la admisión del motor.

Las velocidades son promediadas en fase en 25 ciclos del motor y se presentan en forma de gráficas como función del ángulo de giro del cigüeñal para cada punto de la malla. De igual manera se presenta el campo de flujo completo sobre el plano central del plenum para cada 4.23 grados de giro en todo el ciclo del motor y para cada derivación. Se identifican el fenómeno de reflujo al inicio del proceso de la admisión, las recirculaciones y la acción de la onda de presión. Se incluye un disco que presenta animaciones del campo de flujo en forma vectorial para las tres derivaciones.

En este proyecto también se implementa un nuevo sensor óptico, diseñado en el Laboratorio de Termofluidos de la facultad de Ingeniería de la UNAM, para indicar el PMS del pistón en cada ciclo del motor, reemplazando el encoder, que es un dispositivo comercial.

## **ABSTRACT**

In this project the non-steady field in a model of an internal combustion engine intake manifold is obtained, in order to better understand the flow process. Velocity measurements are obtained by laser Doppler anemometry. The model has a plenum with three runners connected separately each one of them to the intake of an internal combustion engine of four cylinders motored by an electrical engine. The combustion engine is operated with only one cylinder in compression while the other three are opened to the atmosphere. Two components of the velocity field are obtained in a grid with 133 nodes located in the central plane of the plenum, each time a runner is connected to the intake.

Instantaneous ensemble average velocities are obtained for 25 engine cycles and reported as a function of the crank angle for each node of the grid. Likewise the global flow field is presented on the central plane of the plenum for every  $4.2^\circ$  crank angle during the whole engine cycle and for each runner. The reversal flow at the beginning of the intake process, the recirculation and the pressure waves are identified. A CD that presents animations of the vector flow field for the three runners is included.

In this project, a new optical sensor is also implemented. This sensor was designed at the Laboratorio de Termofluidos, UNAM, to indicate the PMS of the piston in each engine cycle, replacing the encoder, which is a commercial device.

## **NOMENCLATURA**

AHC	Anemómetro Hilo Caliente
ALD	Anemómetro Laser Doppler
APMS	Antes del Punto Muerto Superior
CI	Combustión Interna
DPMS	Después del Punto Muerto Superior
HP	Caballo de potencia
i	Número de ciclos arbitrario
Nc	Número de ciclos
PF	Promediado en fase
PMS	Punto Muerto Superior
U	Velocidad promedio
u'	Fluctuaciones de la velocidad

## I.- INTRODUCCION

### 1.1.-OBJETIVO DE LA INVESTIGACION DOCTORAL

El objetivo del proyecto doctoral es estudiar experimentalmente el movimiento del aire en el plenum de un modelo del sistema de admisión de un motor de combustión interna para identificar zonas de reflujos y recirculaciones, así como el efecto en el flujo de la onda de presión generada por el proceso de llenado del cilindro.

### 1.2.- IMPORTANCIA Y JUSTIFICACION

La geometría del sistema de admisión tiene una gran importancia en los motores de combustión interna (CI), debido a la influencia que ejerce sobre las características del flujo de entrada al cilindro, que se reflejan en el funcionamiento del motor. El éxito en el diseño de un sistema de admisión depende del conocimiento del flujo que en él se presenta. Un sistema de admisión bien diseñado lleva al mejoramiento del llenado del cilindro y de las características del flujo de entrada al cilindro, lo que a su vez reditúa en una mezcla eficiente, buena combustión, reducción de emisiones contaminantes y mejoría en la potencia de salida del motor (2, 24, 25, 27). Aunque existen propiedades del flujo que llegan a ser comunes a todos los motores, el carácter exacto del flujo en el sistema de admisión y en el cilindro depende del tipo específico de motor y de la forma del sistema de admisión en particular bajo investigación.

Debido a la importancia de mejorar la comprensión de los fenómenos fluidodinámicos que participan en el sistema de admisión de un motor de CI, en este proyecto se estudia experimentalmente el movimiento del aire en el plenum de un modelo de sistema de admisión. Aunque se han hecho antes estudios en estado estacionario en este tipo de modelos, acoplados a un banco de flujo estacionario, hacen falta estudios en estado transitorio, como el que se presenta en este trabajo, que pueden dar una visión más real del flujo en el sistema de admisión, lo que puede ayudar a localizar zonas en donde se

generan bajas y altas velocidades, vórtices, reflujos y la acción de la onda de presión que son informaciones importantes en el diseño de los múltiples de admisión.

El plenum sujeto a estudio en este proyecto es un paralelepípedo rectangular, con paredes transparentes por la necesidad de acceder a su interior mediante una luz láser. Aunque ésta no es la forma real del plenum en un sistema de admisión, con ella se mantienen las principales características del flujo de los múltiples comerciales, lo que ayuda a la comprensión del fenómeno.

### **1.3.- MOTIVACION Y FUNDAMENTO**

La importancia que tiene el ahorro de energía en el consumo de combustible fósiles y la reducción de las emisiones contaminantes a la atmósfera han motivado a los fabricantes de motores de CI a modificar el diseño de sus nuevos modelos, lo que conlleva a la mejoría de estos factores, cuidando siempre el desempeño del motor. Una de las variaciones significativas que se ha practicado en los nuevos diseños de motores de CI a gasolina, es el cambio del sistema de carburador, que se encarga de dosificar la mezcla de aire y combustible a los cilindros del motor, por un sistema de inyección que mejora el control del combustible.

Actualmente la mayoría de los motores de modelos recientes funcionan con el sistema de inyección de combustible. El sistema de inyección suministra el combustible ya sea arriba del papalote del acelerador, o a unos cuantos centímetros antes de la válvula de admisión, o inclusive en forma directa dentro de la cámara de combustión. Este sistema, además de mejorar el control de combustible, también mejora el proceso de renovación de la carga, ya que en el múltiple de admisión únicamente se conduce aire, como sucede en los motores diesel. La renovación de la carga es el proceso mediante el cual tiene lugar la sustitución de los productos quemados por mezcla fresca de aire y combustible, con el fin de repetir el proceso termodinámico que tiene lugar en el cilindro del motor.

La optimización del proceso de renovación de la carga es importante para mejorar la eficiencia, reducir la tasa de emisiones de contaminantes y mejorar la economía en los motores de CI. En este proceso participa, entre otras partes del motor, el múltiple de admisión. El múltiple de admisión, que puede ser de material metálico o de plástico en los motores nuevos, se encarga exclusivamente de distribuir el aire necesario en cada cilindro.

En el diseño de un sistema de admisión se toman en cuenta los siguientes parámetros (2, 3, 27):

- a).- duración del tiempo de admisión.
- b).- pérdidas por fricción en el recinto y en los corredores.
- c).- campos de velocidades del aire en el recinto.
- d).- Tamaño adecuado del plenum.

La cantidad de aire que entra a los cilindros del motor puede ser aumentada por la sintonización (tuning) del sistema de admisión, de tal manera que la frecuencia natural del múltiple coincida con la frecuencia forzante del pistón. El efecto es una amplificación de las oscilaciones de presión en cierta parte del rango de velocidades de operación del motor, donde exista necesidad de más torque de salida. La frecuencia forzante del pistón genera una onda de presión en el múltiple por su operación periódica (5, 42, 48). La frecuencia forzante impuesta por el pistón se determina con la velocidad del motor y el número de cilindros conectados al múltiple de admisión. Como el pistón se mueve hacia abajo durante la admisión, la presión se reduce con relación a la presión atmosférica. A la mitad del tiempo de admisión, cuando el pistón alcanza su máxima velocidad, la presión llega a un mínimo en la válvula de admisión y una onda de rarefacción comienza a propagarse en el múltiple. Cuando la onda alcanza el extremo del múltiple de admisión, se refleja como una onda de compresión y comienza su retorno hacia la válvula de admisión.

El sistema de admisión puede ser diseñado de tal manera que la onda de compresión llegue justo antes de que la válvula de admisión se cierre y el periodo de oscilación de la

presión coincide con el periodo durante el cual la válvula está abierta (3). Una onda de presión intensa (onda de choque) no aparece en el proceso de admisión de los motores de C.I. de aspiración natural, ya que solo puede existir en un flujo supersónico (53) o en un motor turbocargado (13).

El flujo en el sistema de admisión y en el cilindro ocurre bajo condiciones desfavorables y es necesaria una instrumentación adecuada para la medición en dichos recintos. Se aprovechan las ventajas del Anemómetro Láser Doppler (ALD) para la medición de las velocidades bajo condiciones de operación del motor. El principio de operación de ALD es el siguiente: dos rayos de luz láser se hacen pasar a través de una lente convergente que causa que se intercepten en el punto focal, localizado en el flujo. Estos haces crean un patrón de franjas o volumen de medición. Las partículas sembradas en el flujo reflejan la luz con una frecuencia diferente a la de la luz de incidencia por el efecto Doppler. La frecuencia Doppler es proporcional a la componente de la velocidad de la partícula perpendicular a las franjas. La captación de la luz reflejada se da por medio de diversas lentes y su frecuencia permite una determinación directa de la velocidad de la partícula sin ninguna necesidad de calibración (9). Una de las desventajas del ALD es la necesidad de un acceso óptico en la zona de medición, para recintos cerrados. Para eso se practican ventanas transparentes en las paredes del recinto en donde se requiera realizar la medición.

Existen otras técnicas de medición del flujo, como el Anemómetro de Hilo Caliente (AHC). El AHC basa su principio de operación en la transferencia convectiva de calor desde un hilo caliente o película colocado en el flujo de fluido. Cualquier cambio en las condiciones del flujo que afecte la transferencia de calor desde el elemento sensor (como la velocidad), puede ser detectado instantáneamente por el sistema de AHC. El AHC no puede proporcionar la dirección de la velocidad del flujo, que es una de las ventajas del ALD.

Muchos investigadores, como los que se mencionan en la parte de antecedentes, han intentado identificar que parte de la señal de la velocidad se debe a la velocidad media,

que depende del tiempo en este caso, y que parte a la turbulencia. Esta tarea es complicada ya que los cambios en el flujo medio ocurren en una escala de tiempo de milisegundos, esto es, la misma escala de la turbulencia. Además, la situación se complica por la existencia de variaciones cíclicas en el motor, en donde el campo de flujo no es el mismo de un ciclo a otro por diversas razones.

La técnica del ensamble promedio o de promediado en fase, es el método más común para la evaluación del flujo debido a su naturaleza periódica. En ella la velocidad instantánea, en una posición angular específica, se promedia sobre muchos ciclos hasta que la promediación de  $i$  ciclos comparados con la de  $i+1$  ciclos sean idénticos; la intensidad de turbulencia se considera igual a las fluctuaciones rms de la velocidad con respecto a la velocidad promediado en fase (14, 15, 27). Este método se utiliza para configuraciones de motor donde las variaciones ciclo a ciclo en el flujo medio son relativamente pequeñas.

La velocidad instantánea para un ángulo específico  $\theta$ , en un ciclo particular  $i$ , puede ser escrita como:

$$U(\theta, i) = \bar{U}(\theta) + u(\theta, i)$$

La velocidad promediada en fase (PF) o fase promedio  $\bar{U}(\theta)$  está definida como el promedio de los valores en una fase específica o ángulo sobre  $i$  ciclos, y se representa como:

$$\bar{U}(\theta) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} U(\theta, i)$$

donde  $N_c$  es el número de ciclos para los cuales se obtienen los datos. Repitiendo este proceso para muchos ángulos del cigüeñal, se obtiene el perfil de velocidades PF sobre el ciclo completo. Una consecuencia importante de esta definición es que el PF llega a ser solamente función del ángulo, lo que implica que el flujo medio no varía de un ciclo

a otro. La evidencia de algunos estudios de visualizaciones en flujos ha mostrado que esto no es siempre el caso (3). Sin embargo, se puede argumentar que cualquier cambio o variación en el flujo medio puede ser incluido en las intensidades de turbulencia.

El PF de las intensidades de las fluctuaciones  $u'$  esta dado por:

$$u'(\theta) = \left\{ \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} [u(\theta, i)]^2 \right\}^{1/2}$$

ó

$$u'(\theta) = \left\{ \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} [U(\theta, i) - \bar{U}_{PF}(\theta)]^2 \right\}^{1/2}$$

Otro método de análisis es el denominado variaciones de ciclo a ciclo, en donde el análisis del flujo se hace en un ciclo básico para caracterizar el flujo medio y la turbulencia.

Existen una gran cantidad de trabajos relacionados a las técnicas de extracción y análisis de flujo medio y de la turbulencia en motores de CI, siendo los más significativos los de Catania y Mitica(14, 15), Liou y Santavicca (33), Belmabrouk y Michard (7), Enotiadis et al (22), Hong y Chen (29), Lehmann y Mante (32), Amelio et al (35).

## II.- ANTECEDENTES

### 2.1.-ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Los estudios experimentales en el múltiple de admisión se hacen en la mayoría de los casos bajo condiciones de motor arrastrado, en donde el motor de CI opera sin combustión, el eje del cigüeñal se acopla al eje de un motor eléctrico que lo hace girar al régimen necesario para el experimento. Inclusive, en algunos casos, únicamente se utiliza la cabeza del motor (culata), montada en un banco de flujo estacionario, y el motor eléctrico se acopla al eje del árbol de levas con la finalidad de que las válvulas tengan movimiento real.

De entre los primeros estudios experimentales realizados en el múltiple de admisión se puede citar el de Yeoman y Taylor (57), quienes obtienen los campos de velocidades medias y sus rms en el múltiple de admisión de un motor diesel de 4 cilindros, bajo las condiciones de motor arrastrado y con combustión, a 1460 y a 2600 rpm respectivamente; la finalidad del estudio fue evaluar la capacidad de aplicación del ALD en motores de CI. Este proyecto fue muy básico, ya que se obtuvieron únicamente 8 histogramas de velocidades en un ciclo del motor. Estos autores argumentan que las velocidades promediadas en el múltiple de admisión tienen una fuerte dependencia de la posición en el ciclo del motor y las rms no están relacionadas con las velocidades medias, por lo que la varianza no se origina en regiones de cortantes grandes.

Arcoumanis y Flamang (2) desarrollaron un experimento para analizar flujos transitorios en un sistema de admisión de un motor diesel de 4 cilindros de inyección directa. Las mediciones se hicieron en varios puntos dentro del múltiple con ALD a través de tres ventanas transparentes, colocadas entre dos brazos adyacentes del múltiple de admisión. El motor fue arrastrado a tres regímenes de giro entre 300 y 1100 rpm. Se utilizó únicamente un cilindro con compresión, los otros tres se abrieron a la atmósfera. Concluyeron que el flujo es prácticamente unidimensional en cada brazo individual y repetitivo de un ciclo a otro, con niveles de turbulencia bajos; así mismo, a bajas

velocidades del motor, la inercia del flujo no es suficiente para sostener la inducción del aire después de que el pistón se aleja del PMI, generando así salida del flujo en la válvula de admisión. El campo de flujo cerca de la unión de los corredores, dentro del plenum, se desarrolla durante los cuatros tiempos del ciclo desde un flujo no uniforme y unidireccional a un flujo recirculante de intensidad variable y después se convierte en un flujo prácticamente estancado.

Gasparetti et al. (24) midieron en forma coordinada la velocidad del flujo de entrada en estado estacionario en el múltiple de admisión y el movimiento de la cabeza de la válvula de admisión. El objetivo del experimento fue analizar los efectos que causa el salto de la válvula sobre el campo de flujo de entrada al cilindro. A diferencia de Arcoumanis et al. (2), quienes acoplan un motor eléctrico al eje del motor, Gasparetti et al. acoplan un motor eléctrico al eje del árbol de levas con la finalidad de que las válvulas tuvieran movimiento real. Se utiliza la culata de un motor de 4 cilindros montada en una cámara rectangular de perspex (material transparente similar al acrílico) y este a su vez está conectado a un banco de flujo estacionario. Las mediciones de velocidades se hicieron con ALD en el flujo que entra a la cámara de combustión y en el múltiple de admisión mediante ventanas transparentes practicadas en las paredes. Las vibraciones de la válvula se midieron con un vibrómetro láser Doppler. El análisis de datos se hizo por medio del promediado en fase, en función del ciclo del árbol de levas en lugar del cigüeñal, y en estado estacionario. Estos autores concluyen que las características del flujo alrededor de la válvula de admisión se ven influenciadas por las oscilaciones de velocidad en el múltiple, después del cierre de dicha válvula. También a altas rpm se detectaron funcionamientos anómalos de la válvula y su repercusión en el flujo de entrada.

Shaw et al. (47), con la finalidad de validar su modelo numérico, analizaron experimentalmente el flujo de aire en estado estacionario en un modelo de sistema de admisión, particularmente en un plenum de sección rectangular con tres derivaciones o corredores de sección circular. Las velocidades se midieron con ALD y se registraron en

dos direcciones en varios puntos específicos dentro del plenum. Se conectó un corredor o derivación a la vez a un banco de flujo estacionario, y los otros dos se taparon. Los autores argumentan que cada corredor genera una región de recirculación de flujo en la unión de cada corredor con el plenum, en la fase de admisión del motor, y suponen que deben de existir otros vórtices en esa misma región que se pueden ver si se genera una malla más fina de los puntos de medición. Además concluyen que la simulación numérica de Shaw et al. (46), concuerda con los datos experimentales que obtuvieron.

Banisoileiman y French (6) evaluaron las características inerciales del flujo de aire en estado estacionario y transitorio en el sistema de admisión de 4 motores de CI diferentes, de 1, 4, 6 y 8 cilindros. Los dos primeros motores fueron de aspiración natural y los otros dos, turbocargados. Los dos primeros y el cuarto motor se evaluaron con un sistema ramming, que es el método para supercargar el cilindro de un motor recíprocante por medio de la acción de la onda de presión, y el tercer motor se analizó con un sistema Cser-Helmholtz, que consta de dos recipientes acoplados al motor y conectados por medio de dos tubos largos a una cámara de atenuación en la salida; la operación de este sistema puede ser descrita análogamente a un sistema mecánico masa-resorte, la columna de gas que oscila en los tubos representa a la masa, mientras que la compresibilidad del fluido representa el resorte. Argumentan que el sistema ramming de tubos y el Cser-Helmholtz sintonizador del sistema de admisión, pueden ser usados para incrementar la razón del flujo másico en ciertos rangos de velocidades en motores de CI.

Por otro lado, para validar su modelación numérica, Che y Gia (18) obtuvieron experimentalmente el campo de flujo dentro de dos conductos rectangulares transparentes que simulan los múltiples de admisión y de escape acoplados a un motor de CI arrastrado. Las mediciones se hicieron con ALD en ambos múltiples para dos regímenes de giro del motor de 500 y 700 rpm. He y Jackson (26) evaluaron experimentalmente el campo de velocidades, con ALD, en la parte central de un tubo largo con una sección rectangular. El fluido que se utilizó fue agua, aprovechando la diferencia de niveles que se generan entre dos depósitos alimentados neumáticamente.

Hino et al. (28) estudiaron el flujo periódico de aire en un túnel de viento de sección rectangular de 26x10 cm y 14 m de largo; en uno de sus extremos se colocó un pistón que generó el flujo periódico y el otro se abrió a la atmósfera. Las mediciones se hicieron con ALD y con AHC. Se obtuvieron para las fases de aceleración y deceleración del flujo los perfiles de velocidades medias, intensidades de turbulencias, los esfuerzos de Reynolds y la razón de producción de energía turbulenta. Entre tanto Shemer et al. (48) analizaron experimentalmente flujo pulsante en un tubo de 33 mm de diámetro y 16,5 m de largo, conectado a una cámara grande de un metro cúbico, que recibe el flujo pulsante por medio de una línea conectada a un sistema cilindro-pistón. Las mediciones de velocidades se hicieron con AHC y se analizaron flujos en régimen laminar y turbulento bajo condiciones estacionarias.

Durst et al. (20, 21) estudiaron experimentalmente el campo de flujo en un tubo con una expansión repentina. En uno de los extremos del tubo se colocó un pistón que generó el flujo periódico. Las mediciones del campo de flujo se hicieron por medio de técnicas de visualización de flujo y ALD, en la fase de aspiración del pistón. Se obtuvieron velocidades axial y radial como función de la posición y el movimiento del pistón. Sierens et al. (49) midieron experimentalmente velocidades en un modelo de múltiple de admisión que consiste de dos conductos conectados en un ángulo determinado (45 o 90 grados). Ambos conductos fueron de sección rectangular. El objetivo de su trabajo fue calcular los coeficientes de pérdidas, además de la comparación con un algoritmo numérico para la simulación de flujos turbulentos tridimensionales cuasi-estacionarios en uniones de múltiples de admisión.

El fenómeno ondulatorio también influye fuertemente en el funcionamiento del sistema de admisión de los motores de combustión interna de aspiración natural, por lo que se requiere estudios detallados para optimizar dicho funcionamiento, validar los resultados de una simulación o comprender mejor el fenómeno físico que sucede en el sistema de admisión, que es uno de los objetivos de esta tesis. Dos trabajos importantes que están relacionados con este fenómeno, son los de Harrison y Stanev (59, 60), quienes miden

con diferentes métodos las fluctuaciones de presión y velocidad en el conducto de admisión de un motor monocilindro. La finalidad del primer trabajo fue evaluar cinco métodos, cuatro de los cuales están basados en diferentes formas de medir la presión en el sistema de admisión y uno en la obtención de la velocidad del flujo. Los autores concluyen que no existe un método único universalmente aplicable a todas las situaciones. El segundo trabajo describe un modelo acústico lineal simplificado, aplicado a un motor de combustión monocilindrico. Los autores argumentan que con su modelo se puede estudiar la influencia de la resonancia del conducto en el proceso de admisión y sostienen la siguiente hipótesis: el inicio del proceso de admisión se gobierna por la velocidad instantánea del pistón y el área de abertura de la válvula de admisión, posteriormente la acción de la onda domina el proceso y la depresión causado por el pistón gobierna la intensidad de la acción de la onda. Una relación de presiones en la válvula que es favorable al flujo entrante se mantiene y se maximiza cuando el periodo de abertura de la válvula permita que ocurra al menos una oscilación de la presión en su frecuencia resonante, mientras la válvula este abierta.

Por otro lado también existen estudios experimentales en el sistema de admisión que consideran la transferencia de calor en el flujo de entrada, como lo reportan Wolf et al. (56).

El ALD se ha empleado en una gran cantidad de estudios experimentales para determinar los campos de velocidades en puertos de admisión y cámara de combustión, como se puede ver en Taghavi y Dupon (50), Weclas et al. (52), Rodney (44, 45), Aldo y Ferri(1), Asanuma y Obokata (4), Chandrasekaran et al. (16), Michal y Witze (36), Witze (39, 40, 41), Desantes et al. (19), Payri et al. (38), Wigley y Hawkins (55) entre otros.

En otro tipo de investigaciones, los estudios se centran en conocer las características del spray del combustible inyectado en el múltiple de admisión. Chappuis et al. (17)

analizaron la distribución y las características de las gotas de combustible inyectadas antes de la válvula de admisión en un motor de CI de 4 cilindros, operando con combustión en uno de los cilindros. Brehem y Whitelaw (11) y Johnen y Haug (30), tomaron en cuenta la interacción del spray con las paredes del múltiple y con la pipa de admisión, así como la película de combustible que se forma en la pared después de varias inyecciones de combustibles. Para estos tipos de estudios también se emplea el ALD como herramienta para medir el campo de flujo del spray y del aire en el múltiple. El ALD también puede registrar campos de flujo del spray en la cámara y precámara de combustión como lo reportan Lehmann y Mante (32).

## 2.2.- ESTUDIOS NUMERICOS

En el análisis y predicción del flujo dentro del múltiple de admisión del motor de CI generalmente se usan dos tipos de modelos: unidimensionales y multidimensionales. Los modelos unidimensionales son modelos simplificados de los procesos, en los que los parámetros del flujo sólo cambian de una sección a otra, pero no dentro de la sección misma, y se hacen balances globales de masa, energía, especies químicas etc.. Las ecuaciones que resultan forman un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias simultáneas. La solución de estas ecuaciones (invariablemente numérica) muestra la variación temporal de los parámetros y variables representativos en las zonas de estudios. Benson (8) utilizó el método de las características para resolver las ecuaciones del modelo unidimensional del flujo transitorio y compresible en conductos. Binham (10) utiliza este método para estudiar numéricamente el campo de flujo en la unión de los conductos del múltiple de admisión bajo condiciones transitorias.

Los modelos mutidimensionales suministran información detallada del campo de flujo basada en las soluciones de las ecuaciones diferenciales de conservación. Zhao y Winterbone (58) utilizaron estos modelos para simular el proceso de renovación de la carga en el múltiple de admisión de un motor de CI. El objetivo fue desarrollar una herramienta de simulación que pueda predecir las características del flujo en estado transitorio dentro del múltiple de admisión. Ravi et al. (43) utilizaron un modelo multidimensional para estudiar el campo de flujo oscilatorio dentro de un conducto curvado. Ellos argumentan que los perfiles de velocidades en el conducto curvado están influenciados fuertemente por el radio de curvatura del conducto y el número de Reynolds. Shaw et al. (46) estudiaron numéricamente el campo de flujo en estado estacionario dentro del plenum del múltiple de admisión, utilizando modelos de turbulencia. También describen la comparación entre los resultados numéricos y resultados experimentales. Las características del plenum que utilizaron son las mismas que se utiliza en el modelo experimental reportado en (47).

Fu et al. (23) estudiaron numéricamente el campo de flujo dentro del múltiple de admisión de un motor de CI. La geometría del múltiple fue en forma de T y de sección rectangular, con un solo corredor. El objetivo fue predecir las velocidades medias y los niveles de energía turbulenta en el modelo del múltiple de admisión. Miyano y Hubbard (37) simulan el flujo de entrada dentro al múltiple de un motor de CI. El objetivo de su trabajo fue generar valores de presión y temperatura, flujo másico, flujo de calor y eficiencia volumétrica global en el múltiple.

Con la información obtenida de los modelos numéricos se logra un buen diseño del múltiple de admisión que puede ayudar a mejorar la eficiencia volumétrica y un buen control de la distribución del aire en los cilindros (34, 37, 51).

Existe una gran cantidad de trabajos que se han hecho numéricamente relacionados con el análisis de las características del spray de combustible en el sistema de admisión de un motor de CI. Como ejemplo se tiene el trabajo de Thompson y Gong (51). Kuo y Chang (31) estudiaron numéricamente el flujo de aire e inyección de combustible en un puerto de admisión de un motor de CI. Brown y Ladommatos (12) estudiaron numéricamente el spray, la evaporación del combustible y el espesor de la película de combustible adherida a la pared del múltiple de admisión.

## 2.3.- COMENTARIO FINAL

Como se ha visto en la revisión de los artículos sobre investigaciones relacionados con el sistema de admisión, ya sean experimentales o numéricas, todos se orientan a los corredores del múltiple de admisión, y casi nadie se enfoca en el plenum, excepto los dos trabajos de Shaw et al. (46, 47) y de Arcoumanis y Flamang (2), con la salvedad de que los primeros estudios se hacen bajo condiciones estacionarias y el segundo, en estado transitorio, sólo se enfoca a algunos puntos dentro de los corredores y en ciertos puntos cerca de la unión de los corredores con el plenum.

Como se ha comentado párrafos arriba, el análisis de flujo transitorio en múltiples de admisión mejora la comprensión dentro del mismo y es bien conocido que el éxito del diseño de un sistema de admisión depende fuertemente de los mecanismos dinámicos dentro del plenum. Generalmente la acción de la onda y los efectos de inercia son dos fenómenos que pueden ser comprendidos para mejorar el funcionamiento de un motor de CI. Estos dos fenómenos influyen fuertemente sobre el llenado y vaciado de los cilindros desde el plenum.

Actualmente en la literatura especializada no se encuentran datos experimentales de flujos en estado no estacionario en el plenum de un sistema de admisión. Debido a esto, este proyecto doctoral se dirige al análisis de las características del flujo en estado transitorio en un modelo simplificado de sistema de admisión plenum corredores.

### III. DESCRIPCION DEL MODELO, EQUIPO E INSTRUMENTACION

#### 3.1.- MODELO DEL MULTIPLE DE ADMISION

El modelo del múltiple de admisión (plenum-corredores) sujeto a estudio, tiene la forma y las dimensiones que se muestran en la figura 3.1.

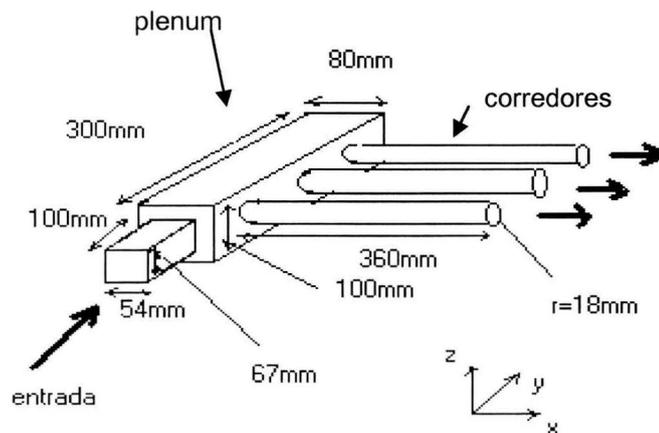


Figura 3.1. Modelo del múltiple de admisión

Se observa que el cuerpo principal del múltiple (plenum) tiene la forma de un paralelepípedo rectangular con un volumen de  $30 \times 8 \times 10 \text{ cm}^3$ . Este se conecta a un conducto pequeño de sección rectangular, de  $10 \times 5.4 \times 6.7 \text{ cm}^3$ , que viene siendo la entrada principal del flujo al plenum. También se observan tres corredores de sección circular, de 36 cm de largo y 1.8 cm de radio, que se derivan de una de las caras del plenum. Todas las caras del plenum están hechas de vidrio plano de 3 mm de espesor, excepto la cara de la que se derivan los corredores, que es de acrílico y del mismo espesor que el vidrio. El sistema de admisión mantiene en términos generales la forma que se utiliza en los motores de vehículos modernos. La forma y las dimensiones del modelo propuesto en este estudio son iguales a las que se utilizaron en las investigaciones experimentales de Shaw et al. (47), sólo que ellos hicieron sus pruebas en condiciones estacionarias.

### **3.2. EQUIPO E INSTRUMENTACION**

En los experimentos los corredores se acoplan uno a la vez a la admisión de uno de los cilindros de un motor de CI, de marca Datsun, de 4 cilindros, de 1600 cc de desplazamiento. El acoplamiento se hace mediante una manguera flexible de 50 cm de longitud, del mismo diámetro que los corredores.

Las características del motor se resumen en la tabla 3.1. El motor opera sin combustión (motor arrastrado) y se acciona con bandas y poleas mediante un motor eléctrico de 1 HP. El régimen de giro del motor de CI se mantuvo constante a 725 rpm y se monitoreó con un tacómetro óptico cada 5 minutos del proceso de medición. Un esquema del arreglo experimental, incluyendo el Anemómetro Láser Doppler (ALD) se muestra en la figura 3.2. Así mismo, en la figura 3.3 se muestra una fotografía del arreglo experimental completo montado en su sistema de posicionamiento.

**TABLA 3.1.- CARACTERISTICAS GEOMETRICAS Y OPERACIONALES DEL MOTOR DATSUN 1600 CC.**

DIAMETRO X CARRERA	78x82 mm
CILINDRADA	1565 cm <sup>3</sup>
VELOCIDAD DEL MOTOR (MOTOR ARRASTRADO)	725 RPM
NUMERO DE CILINDROS	4 EN LINEA
NUMERO DE CILINDROS CON PISTON OPERANDO PARA LOS EXPERIMENTOS	1
CAMARA DE COMBUSTION	CONCAVA
RELACION DE COMPRESION	8.3:1
APERTURA DE LA VALVULA DE ADMISION	20° ANTES DEL PUNTO MUERTO SUPERIOR
TRASLAPE VALVULAR	4°
CIERRE DE LA VALVULA DE ADMISION	25° DESPUES DEL PUNTO MUERTO INFERIOR
DURACION DEL TIEMPO DE ADMISION	225°

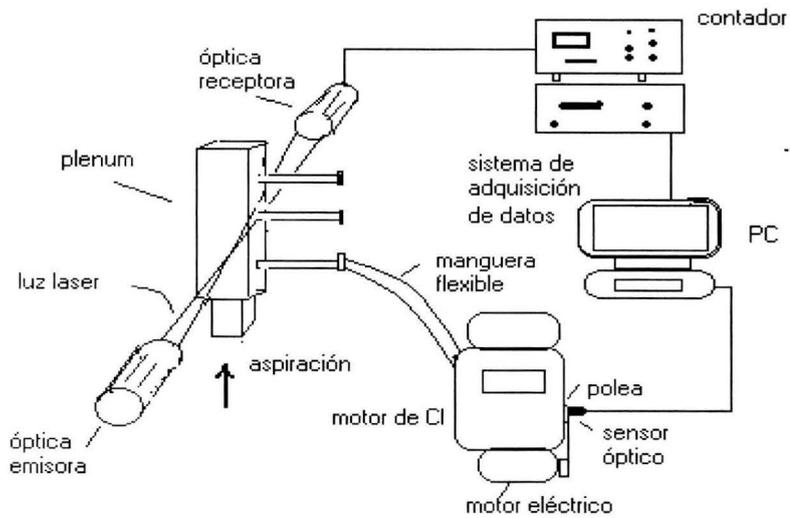


Figura 3.2.- Arreglo experimental.

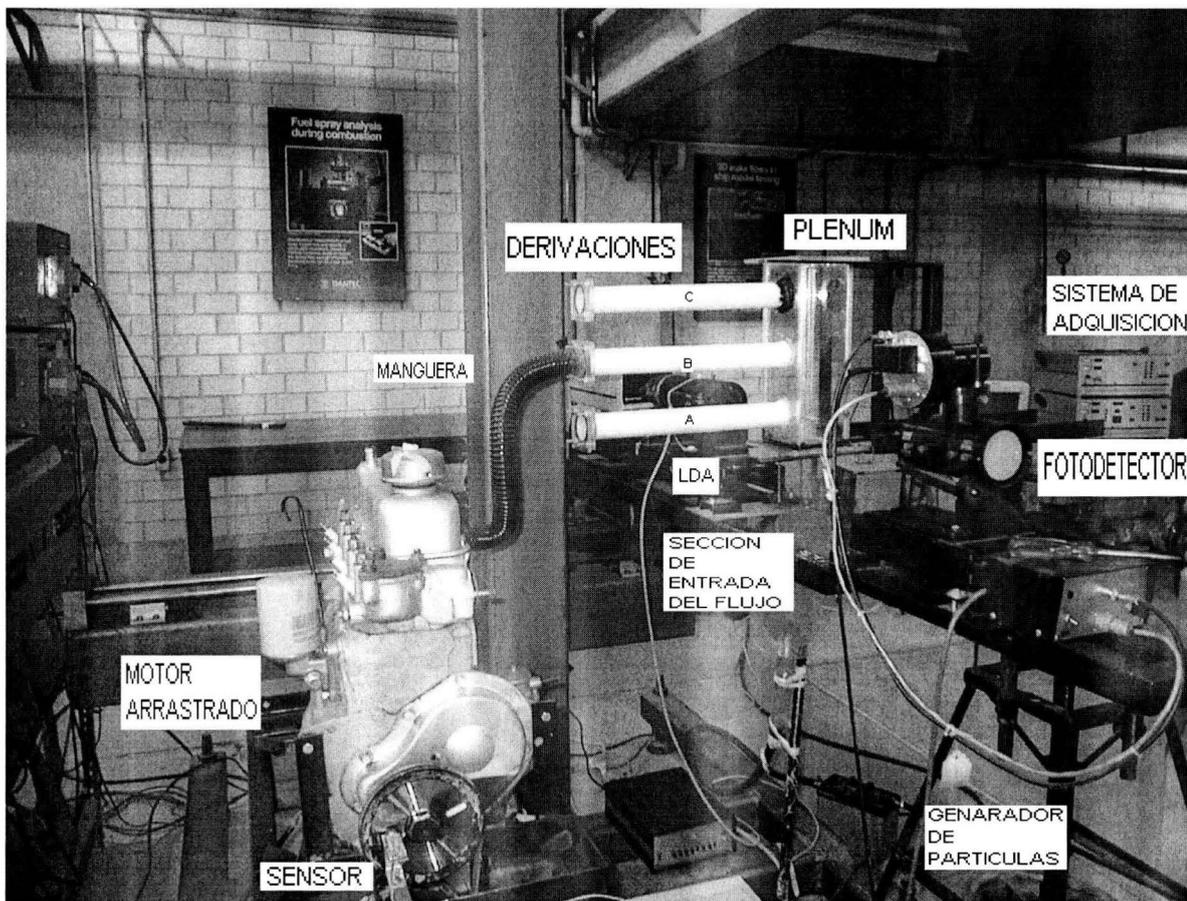


Figura 3.3.- Fotografía de arreglo experimental montado en su sistema de posicionamiento.

Con la finalidad de contar con un punto de referencia en el ciclo del motor, en este caso el punto muerto superior del tiempo de compresión, frente a la polea se instrumenta un sensor óptico reflectivo (HOA1405Honeywell), en sustitución de un encoder, que es el dispositivo comercial que se emplea con este propósito (ver figura 3.4).

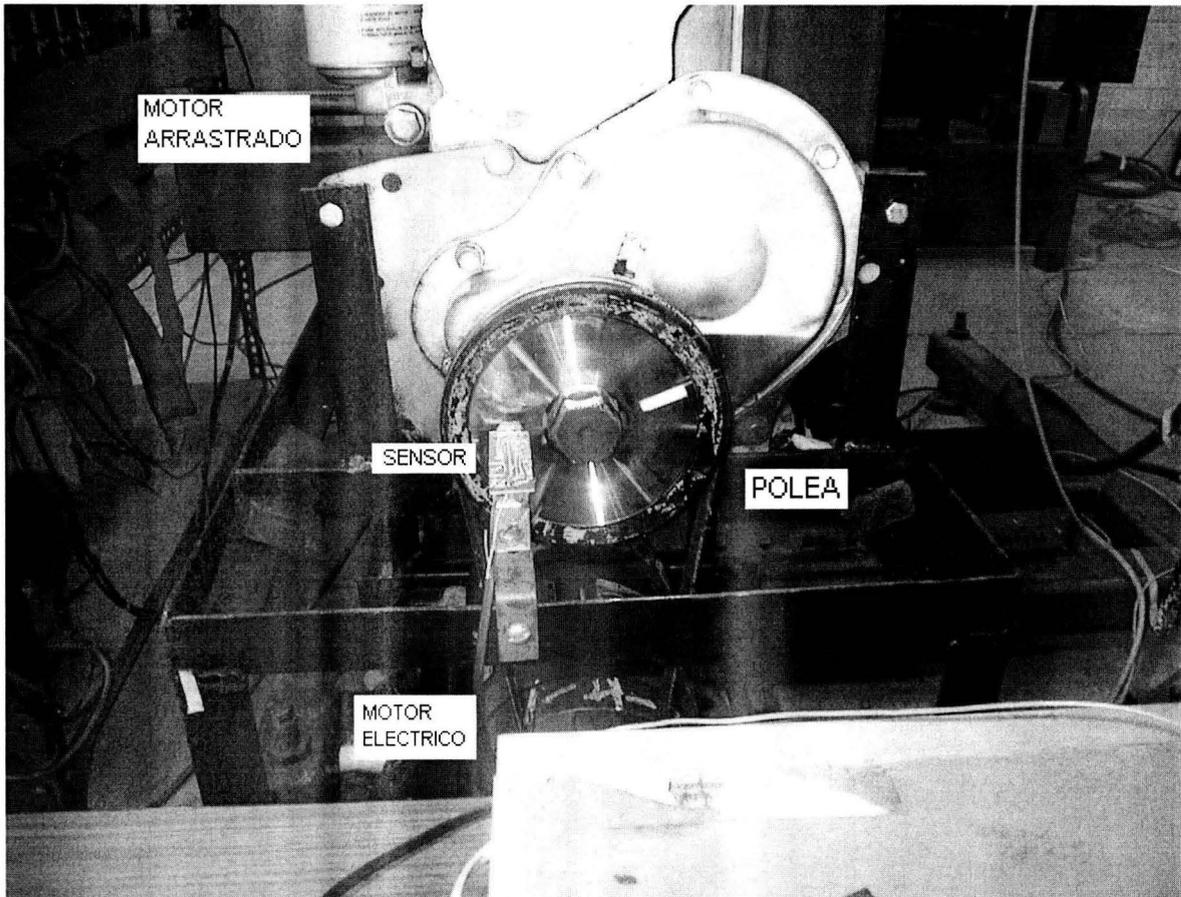


Figura 3.4.- Sensor óptico montado en frente de la polea del motor arrastrado

El sensor responde con pulsos eléctricos cuando la luz infrarroja se refleja en un disco que se coloca sobre la polea y controla la adquisición de los datos mediante una interface y un contador de frecuencias (55L90a de DANTEC). El disco reflejante contiene una pequeña sección opaca de 2 grados que interrumpe momentáneamente la adquisición de los datos, lo que indica la posición del PMS. En cada ciclo del motor, el sensor se adecuó para transmitir 170 pulsos, es decir, un pulso por cada 4.23 grados, por lo que se adquieren 170 datos de velocidades instantáneas en cada ciclo.

El campo de flujo en un sistema de admisión es bastante complejo por lo que es necesaria una instrumentación adecuada para su medición. Para esto se aprovechan las ventajas del ALD en las mediciones de las velocidades y sus rms en el plenum del múltiple de admisión del modelo propuesto.

El ALD que se utiliza en este trabajo comprende un láser de un solo color de He-Ne de 35 mW de potencia, con una longitud de onda de 632.8 nm y una celda de Bragg de 40 MHz que permite la detección de la dirección de la velocidad del flujo.

Para llevar a cabo las mediciones con ALD, es necesario que existan partículas pequeñas que viajen con el flujo y que sean capaces de dispersar la luz. Para esto se contaminó el flujo que entra en el plenum con partículas pequeñas, de 4 a 5 micras, mediante un atomizador comercial (55L18DISA), con una solución de glicerina en agua de 50%. Se mantuvieron constantes la densidad de generación y la velocidad de salida de las partículas sembradas.

La frecuencia de la luz dispersada en la zona de medición por las partículas sembradas se obtiene mediante un contador de alta frecuencia incorporado a un circuito de validación de amplitud y frecuencia (55L90a DANTEC).

El ALD se monta en un sistema de posicionamiento tridimensional independiente, lo que permite ubicar el volumen de medición en 133 puntos en el plano central del plenum.

## IV.- PRUEBAS PRELIMINARES

Con el propósito de verificar el buen funcionamiento del sistema de medición se llevaron a cabo una serie de pruebas preliminares, partiendo del flujo más sencillo, el chorro libre, para llegar al final a una configuración muy similar a la del modelo del múltiple de admisión. En esta sección se muestran las gráficas más representativas de todos los experimentos preliminares que se llevaron a cabo.

### 4.1.- MEDICIONES EN CHORRO LIBRE

La primera prueba que se monta en este trabajo, la del chorro libre, sirve para la validación de las mediciones de velocidades mediante el ALD. Los perfiles de velocidad medidos se comparan con los obtenidos con la siguiente fórmula semiempírica que se reporta en la literatura especializada (ver por ejemplo White (54)):

$$\frac{u}{U_{max}} = \operatorname{sech}^2\left(10.4 \frac{y}{x}\right)$$

El chorro libre sale de una tobera de 8 mm de diámetro. El registro de velocidades se hace en diferentes posiciones radiales y a diferentes distancias  $x/D$ , en donde  $x$  es la distancia desde la salida del chorro hasta la posición donde se hicieron las mediciones, y  $D$  es el diámetro de la tobera.

La figura 4.1 muestra el perfil de velocidades promedio temporal que se obtuvo en forma experimental utilizando ALD, comparado con el que se obtuvo con la fórmula semiempírica, para el caso de un chorro a una distancia de  $x/D=20$ .

Como se observa en la figura, el perfil obtenido experimentalmente con el ALD se compara de manera aceptable con el generado por la fórmula semiempírica.

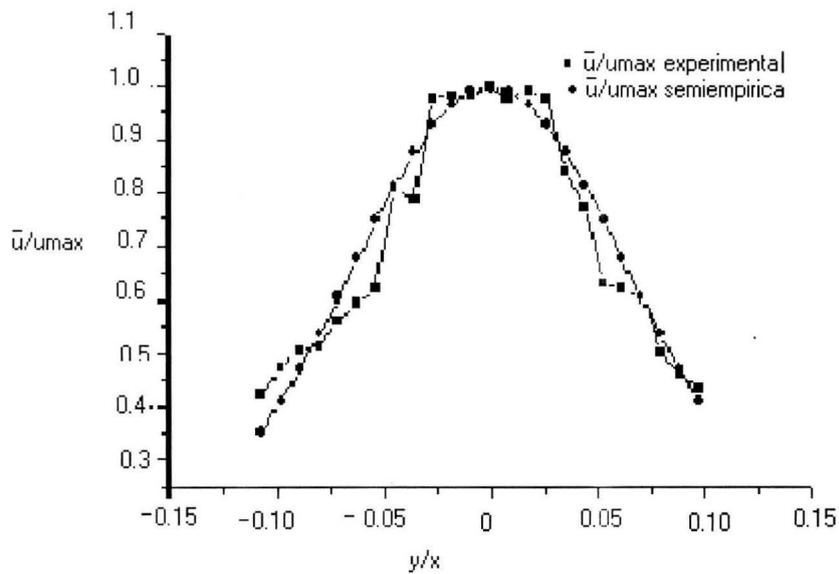


Figura 4.1.- Perfiles de velocidades medidas y calculadas para el caso del chorro libre que sale de una tobera de 8 mm de diámetro a una distancia de  $x/D$  igual a 20.

## 4.2.- MEDICIONES EN UN CONDUCTO RECTANGULAR

En otro tipo de arreglo experimental se obtienen mediciones de velocidades en un conducto transparente que simula el corredor de un múltiple de admisión. El conducto es de sección transversal rectangular y se conecta en la admisión de un motor de CI arrastrado que gira a 725 rpm. El arreglo completo se muestra en la figura 4.2. Se utilizan dos conductos de 18 y 45 cm de largo y  $4 \times 5 \text{ cm}^2$  de sección transversal, acoplados al motor con mangueras de diferentes longitudes, y con o sin un recipiente de atenuación.

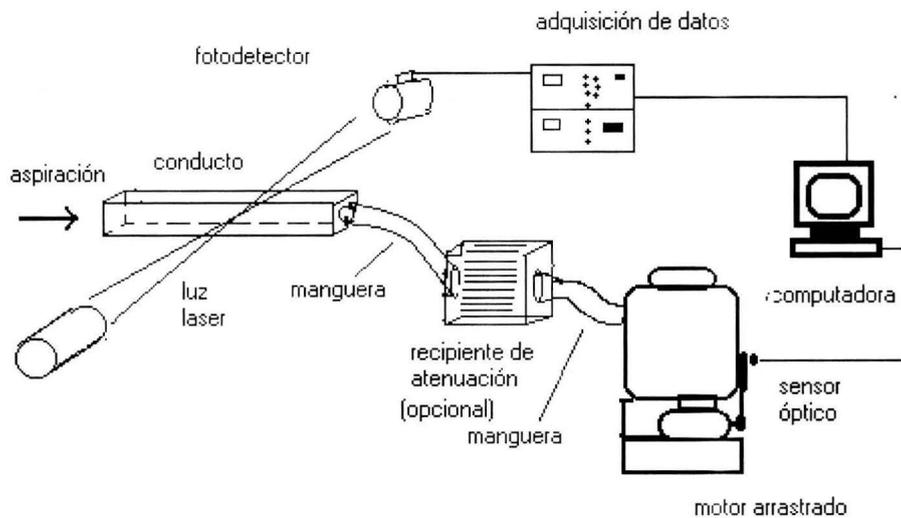


Figura 4.2 - Arreglo experimental para el conducto rectangular.

Las pruebas se hacen con la finalidad de verificar que la técnica de ALD se pueda aplicar con confianza al estudio del flujo transitorio en conductos transparentes de sección rectangular, similares al plenum del modelo propuesto en esta tesis.

Las mediciones de velocidades instantáneas se hicieron en el punto central del conducto rectangular transparente. Se estudiaron algunas variantes del arreglo mostrado en la figura 4.2. Se utiliza la técnica del promediado en fase para obtener el promedio de las velocidades en 25 ciclos del motor. Este número mínimo de ciclos se halló mediante un estudio de sensibilidad del promediado. La figura 4.3 muestra los resultados del estudio de sensibilidad, en donde los perfiles de velocidades promediados en fase se comparan para 15, 20, 25 y 50 ciclos. Se observa que a partir de los 25 ciclos, el perfil del promediado ya no se modifica. El arreglo experimental que se utiliza para este estudio de sensibilidad fue el de la figura 4.2 sin el recipiente de atenuación con un recinto rectangular de longitud  $L = 45$ , y una manguera de longitud  $L_m = 60$  cm que conecta el recinto con el motor.

Las mediciones se hicieron sólo durante la carrera de admisión.

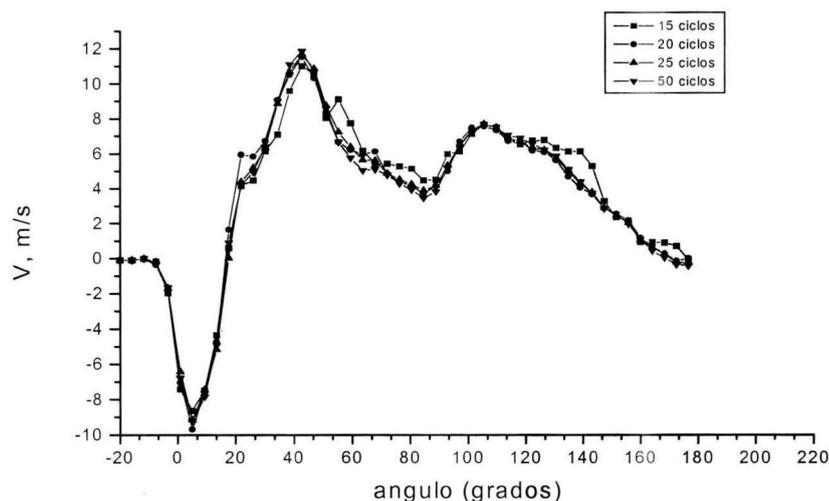


Figura 4.3.- Sensibilidad al número de ciclos, mediciones hechas en la posición 1, en el conducto de  $L=45$  cm. (conducto de 45 cm + manguera de 60 cm + motor)

La tabla 4.1 que se muestra a continuación sintetiza los arreglos que se utilizaron para generar las gráficas de esta sección. El orden de los accesorios en la tabla corresponde al

que se tiene en la figura 4.2 leídos de izquierda a derecha. Para el caso de la figura 4.11 se agregó, además, una manguera de 30 cm de longitud antes del recinto rectangular.

**TABLA 4.1.- RESUMEN DE TODOS LOS ARREGLOS QUE SE UTILIZARON EN LOS EXPERIMENTOS PRELIMINARES.**

FIGURA	Recinto L= 45 cm	Recinto L=18 cm	Manguera Lm = 92 cm	Manguera. Lm = 60 cm	Manguera Lm=30 cm
4.4		X			X
4.5	X				X
4.6		X		X	
4.7	X			X	
4.8		X	X		
4.10	X		X		
4.11	X		X		X

Todas las figuras muestran una velocidad negativa al inicio, que corresponde al reflujo proveniente del cilindro, y que se puede explicar de la siguiente manera: cuando la válvula de admisión empieza abrir, 20 grados antes del punto muerto superior (APMS), se genera una diferencia de presiones entre el cilindro y el conducto de admisión, debido a que el pistón mantiene su movimiento en forma ascendente hacia el PMS (terminando el proceso de escape); esto genera el reflujo de aire desde el cilindro hacia el conducto de admisión.

Se observa también que grados más adelante el comportamiento de todas las gráficas es similar, conteniendo picos y valles. Estos picos y valles corresponden a ondas de rarefacción y de compresión que perturban el flujo en el conducto de admisión. La onda de rarefacción se genera durante el proceso de admisión, y se refleja en los cambios de sección, o en el extremo abierto, como onda de compresión. Esta reflexión se superpone a la onda original. Debido a este fenómeno, las gráficas presentan importantes variaciones dependiendo de las longitudes del recinto rectangular y de las mangueras que se utilizan antes y después de él.

De esta manera, la gráfica de la figura 4.4 presenta tres picos bien marcados y uno amortiguado que están separados a 33 grados. También se observan 3 zonas de velocidades bajas (valles) que están separados a 34 grados.

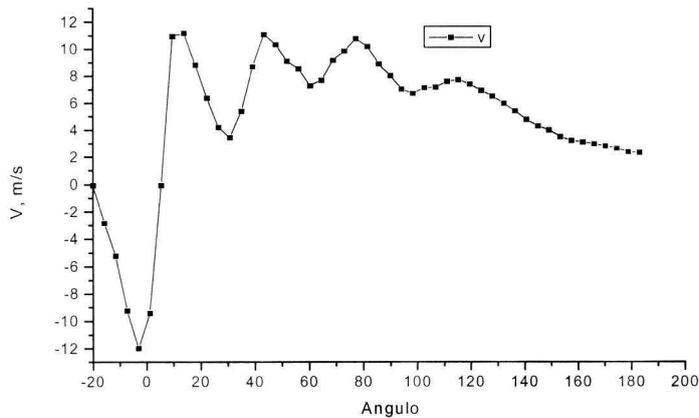


Figura 4.4.- Velocidades para el arreglo: recinto rectangular de 18 cm + manguera de 30 cm + motor.

Para la figura 4.5 se utiliza la misma manguera de la figura 4.4 pero el recinto fue de una longitud  $L = 45$  cm. En esta gráfica aparecen 3 tres picos y dos valles separados 40 y 42 grados respectivamente.

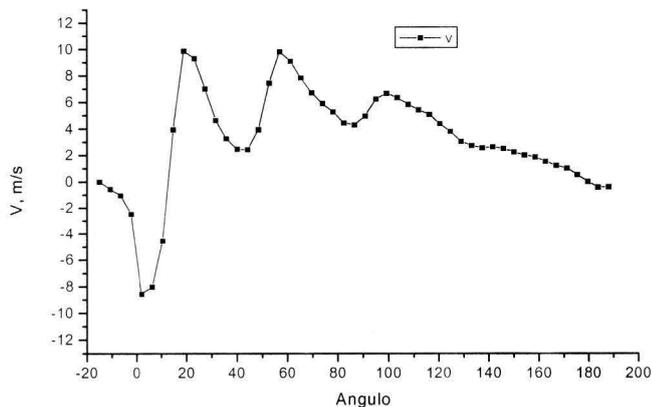


Figura 4.5.- Velocidades para el arreglo: recinto rectangular 45 + manguera de 30 cm.

La gráfica de la figura 4.6, se obtuvo con un recinto de longitud  $L = 18$  cm, conectado a una manguera de longitud  $L_m = 60$  cm. La separación de pico a pico y de valle a valle en esta figura es de 55 grados.

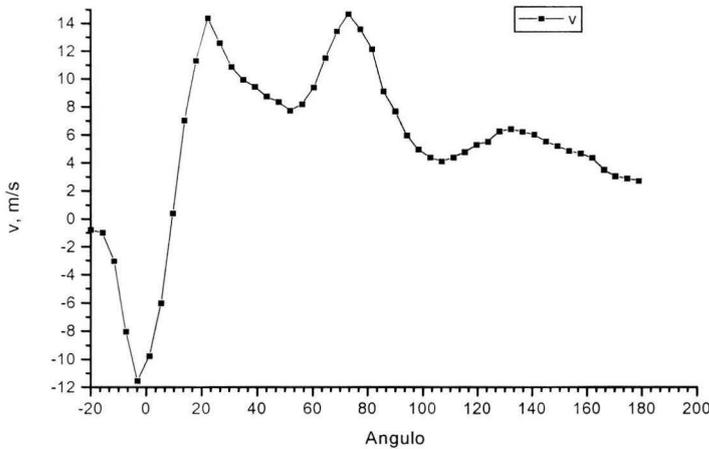


Figura 4.6.- Velocidades para el arreglo: recinto rectangular de 18 cm + manguera de 60 cm.

En la figura 4.7 se observa que existen dos picos y un valle. Los dos picos se encuentran separados a 59 grados. Las mediciones se hicieron para un recinto rectangular de longitud  $L = 45$  cm conectado a una manguera de longitud  $L_m = 60$  cm.

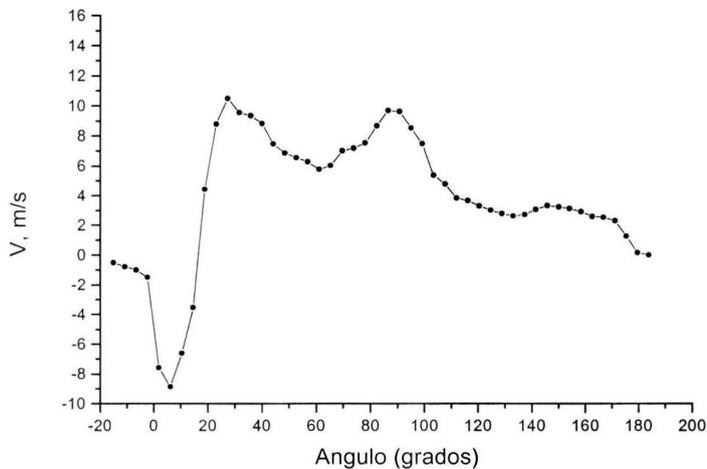


Figura 4.7. Velocidades para el arreglo: recinto 45 cm + manguera 60 cm.

Con respecto a la gráfica de la figura 4.8 para el recinto de longitud  $L=18$  cm, con una longitud de la manguera de  $L_m = 92$  cm, también aparecen dos picos y un valle de velocidades, pero la separación entre pico y pico aumenta a 63 grados.

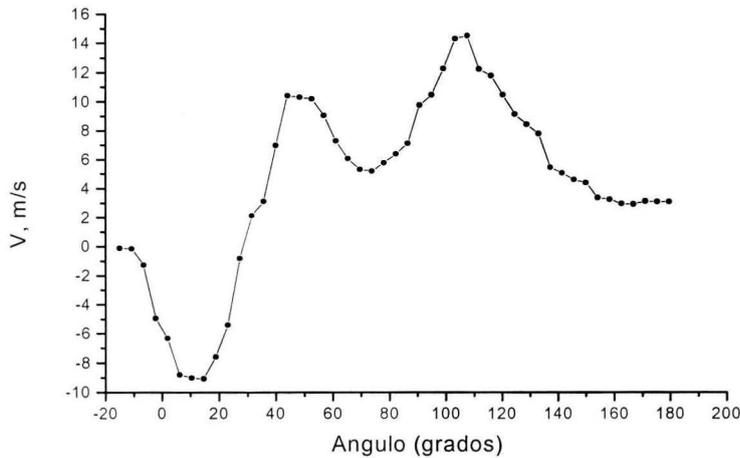


Figura 4.8.- Velocidades para el arreglo: recinto de 18 cm + manguera de 92 cm.

En la figura 4.9 aparecen otra vez los dos picos de velocidades separados a 65 grados. La medición se hace en el recinto rectangular de longitud  $L = 45$  cm conectado al motor mediante una manguera de longitud  $L_m = 92$  cm.

Finalmente la figura 4.10 muestra la velocidad medida en el recinto rectangular de longitud  $L = 45$ , que se conecta al motor mediante una manguera de longitud  $L_m = 92$  cm, y que en el otro extremo cuenta con una manguera de longitud  $L_m = 30$  cm. La gráfica presenta un solo pico de velocidad, lo que la hace diferente a las demás.

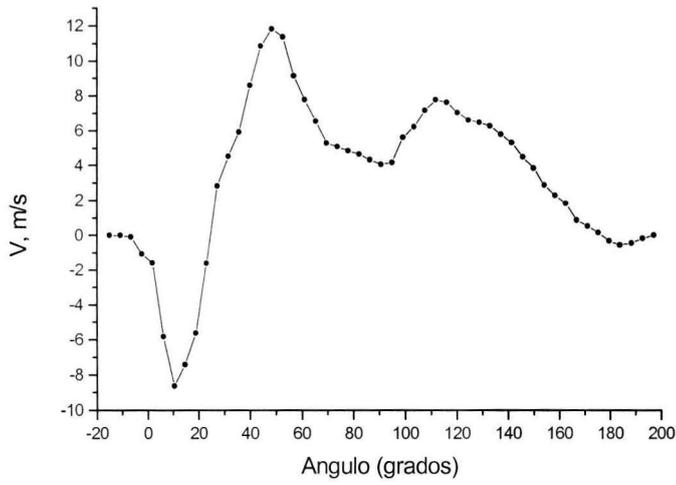


Figura 4.9.-Velocidades para el arreglo:recinto rectangular de 45 cm + manguera de 92 cm + motor

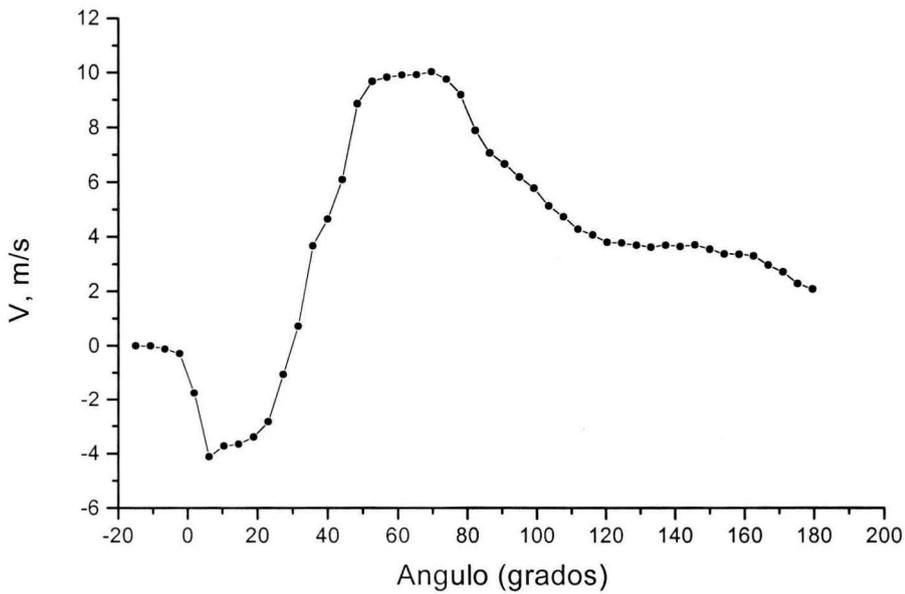


Figura 4.10.-Velocidades para el arreglo:manguera de 30 cm + recinto rectangular de 45 cm + manguera de 92 cm + motor.

Se observa en las gráficas de las figuras anteriores que mientras más largo sea el conducto de admisión el número de crestas y valles disminuye debido a que en un conducto largo la frecuencia de reflexión de las ondas en los extremos es menor que para un conducto corto.

Se piensa que las crestas y los valles se generan cuando se superponen los efectos de las ondas reflejadas en ambos extremos, que pueden ser de compresión o rarefacción, a la depresión que produce el pistón. Este último efecto es sin duda el más importante en el llenado del cilindro, que es el que induce durante todo el proceso de admisión una corriente hacia la válvula.

La hipótesis del párrafo anterior se sustenta en la forma en que se propagan y se reflejan las ondas en conductos. Considerando la onda de expansión o rarefacción que se genera en el tiempo de admisión al alejarse el pistón del PMS, al propagarse en la manguera se encuentra con una zona de expansión en el recinto rectangular. Parte de esta onda se transmite, manteniendo la dirección de la original, y parte se refleja regresando hacia el cilindro. La amplitud de estas dos ondas es función de la relación de áreas del recinto y la manguera, que en este caso es de 2.5. La onda que se transmite, después de la zona de ensanchamiento, se refleja en forma de onda de compresión en el extremo abierto a la atmósfera, regresando al recinto rectangular nuevamente. En esta dirección la onda se encuentra con una contracción, lo que origina que parte se transmita a través de la manguera y parte se refleje en el recinto rectangular con dirección al extremo abierto. La superposición de la onda de rarefacción original con las reflejadas en los extremos y contracción (expansiones) es muy compleja, y para una descripción completa del fenómeno se deben resolver las ecuaciones de flujo compresible en el conducto, lo que cae fuera del objetivo de esta tesis (ver referencia 59 y 60).

En todas las figuras, casi al término del proceso de admisión, alrededor de 200 grados, se observan velocidades bajas debido a que la inercia del flujo no es suficiente para mantener la inducción después de que el pistón se aleje del punto muerto inferior. Este último es típico en motores operando a bajos regímenes de giro.

La tabla 4.2 muestra las velocidades en el reflujos, en las crestas y en los valles.

**Tabla 4.2.- MAGNITUDES DE LAS VELOCIDADES PROMEDIOS EN LOS PUNTOS DE REFLUJO, PICOS Y VALLES QUE PRESENTAN LAS GRÁFICAS DE LAS FIGURAS.**

FIGURA	VEL. EN REFLUJO (m/s)	VEL. EN PRIMERA CRESTA (m/s)	VEL. EN PRIMER VALLE (m/s)	VEL. EN SEGUNDA CRESTA (m/s)	VEL. EN SEGUNDO VALLE (m/s)	VEL. EN TERCERA CRESTA (m/s)	VEL. EN TERCER VALLE (m/s)	VEL. EN CUARTA CRESTA (m/s)
4.3	- 9.8	12.0	3.2	7.0				
4.4	- 12.0	11.1	3.4	11.0	7.2	10.79	6.7	7.7
4.5	-8.0	9.8	2.4	9.8	4.3	6.6		
4.6	- 11.7	14.6	7.8	14.8	3.9	6.0		
4.7	-8.8	10.4	5.7	9.6				
4.8	-9.0	10.4	5.1	14.5				
4.9	-8.6	11.8	4.0	7.8				
4.10	-4.1	10.0						

Se observa que las velocidades máximas en el reflujos, en promedio, son parecidas, excepto en el caso de la figura 4.10. Las velocidades en la primera cresta son parecidas en todos los casos, al igual que las velocidades en el primer valle (excepto en la figura 4.6). De la segunda cresta y valle en adelante las magnitudes de las velocidades en los distintos casos son diferentes. Esto se puede deber a los diferentes longitudes de los conductos.

Sin embargo, la longitud acústica del conducto se puede obtener de la siguiente expresión, que se encuentra en la referencia (59):

$$X = (a/4f)$$

donde  $a$  es la velocidad de propagación de la onda acústica, y  $f$  es la frecuencia del pico dominante del espectro de frecuencia, obtenido de la señal instantánea de velocidad. Por ejemplo, para el caso que se presenta en la figura 4.5, el espectro de frecuencia correspondiente es el que se muestra en la figura 4.11, que tiene un pico en  $f = 107$  Hz, por lo que con la relación anterior se obtiene una longitud acústica de 0.8 m, siendo la longitud real del conducto de admisión de 0.75 m, lo que da una buena concordancia. De

la misma manera, para el caso de la figura 4.7, el espectro de frecuencia de la figura 4.12 muestra un pico en  $f = 85$  Hz, por lo que la longitud acústica es de 1.0 m, siendo la longitud real de 1.05 m.

En resumen, se ha verificado el buen funcionamiento del sistema de medición en un flujo sencillo y en un recinto cerrado similar al usado en el modelo de múltiple de admisión en la presente tesis. Por otro lado, se establece una hipótesis sobre la generación sobre los picos y valles en las curvas de velocidad instantánea, y se calcula la longitud acústica, que se compara bien con la longitud real.

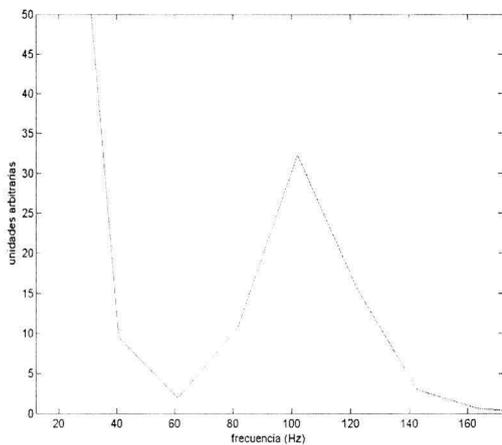


Figura 4.11.- Espectro de frecuencia de velocidades, de la figura 4.5.

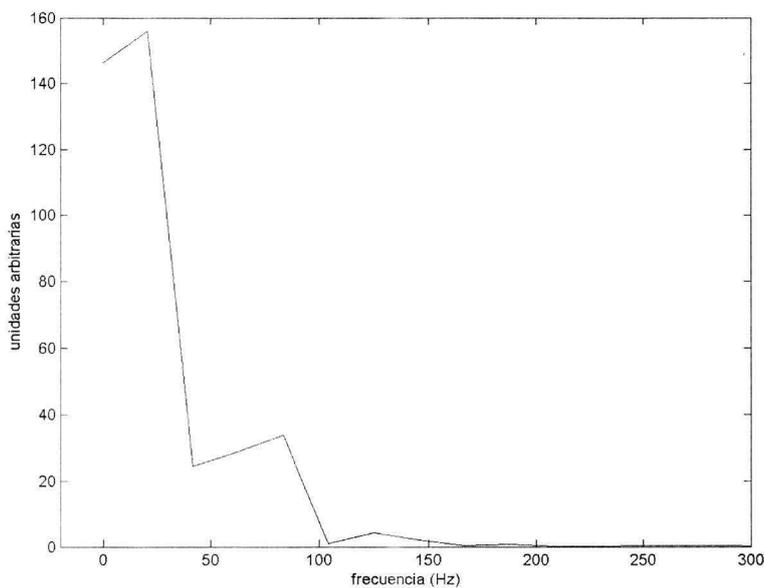


Figura 4.12.- Espectro de frecuencia de velocidades, de la figura 4.7.

## **V.- RESULTADOS DE LAS MEDICIONES EN MODELO PROPUESTO**

En este capítulo se presentan los resultados de las mediciones hechas con el ALD del campo de velocidades del flujo de aire en el modelo del múltiple de admisión. En dicho campo se identifican dos fenómenos: el reflujo y el efecto que causa la onda de presión. El flujo se tiene principalmente en el plano paralelo al eje de los corredores, es decir, la componente de la velocidad perpendicular a dicho plano es relativamente pequeña, lo que concuerda con los trabajos de Durst et al. (20, 21). Las velocidades se promedian en fase en 25 ciclos del motor, se presentan en función del ángulo de giro del cigüeñal y se normalizan con la velocidad media del pistón, que es de 1.98 m/s.

Se usan las mismas condiciones de motor arrastrado que se describieron en el capítulo IV. En el capítulo III se muestran el modelo en cuestión y el arreglo experimental que se utiliza.

Las mediciones se hacen en el plano central del modelo (plenum) en 133 puntos, tres localizados en la entrada y 130 en el cuerpo principal. Los puntos de la entrada están alineados y se encuentran a distancias de 1,4 y 8 cm con respecto a la línea de referencia, como se muestra en la figura 5.1. En el cuerpo principal, los puntos están distribuidos en una malla de 13 filas por 10 columnas, con 2.5 cm de separación en cada fila, excepto la primera y la última que están separados de sus filas adjuntas en 1.5 cm respectivamente; por otro lado las columnas están separadas a 0.6 cm entre sí. La figura 5.1 muestra el bosquejo de la distribución de los puntos de medición en el plenum.

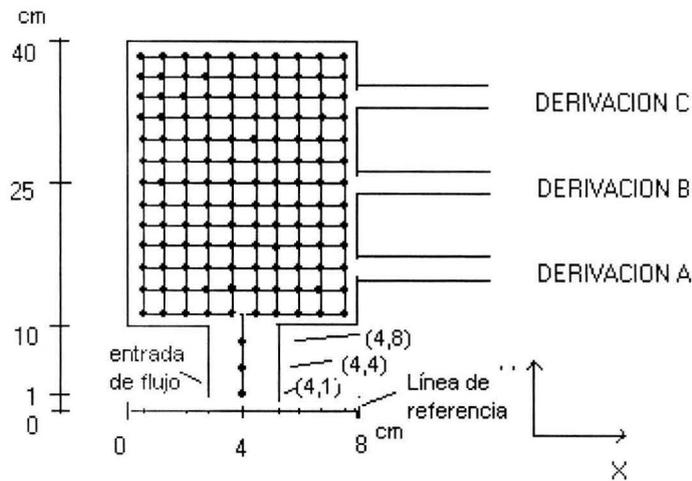


Figura 5.1.- Distribución de puntos de medición en el plano central del plenum.

### 5.1.- MEDICIONES DE VELOCIDADES EN LA ENTRADA DEL PLENUM.

Los tres puntos de medición que están en la entrada del plenum se localizan en las coordenadas (4,1), (4,4) y (4,8). En base a las mediciones en esta zona las velocidades resultan unidireccionales. Si consideramos la entrada como un corredor del múltiple, se reafirman las conclusiones de Arcoumanis et al. (2), de que en los corredores el flujo es unidireccional; así mismo, Shaw et al. (47) presentan campos de velocidades unidireccionales en esta parte del plenum.

Para cada punto de medición de la entrada, se obtienen 3 gráficas de velocidades, una para cada corredor conectado a la admisión del único cilindro que opera con pistón en el motor de CI arrastrado. Sin embargo solo se presentan las gráficas correspondientes al punto (4,1), ya que los otros dos puntos muestran un comportamiento similar. Las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 presentan las velocidades para este caso, con las derivaciones A, B y C conectados una a la vez al motor.

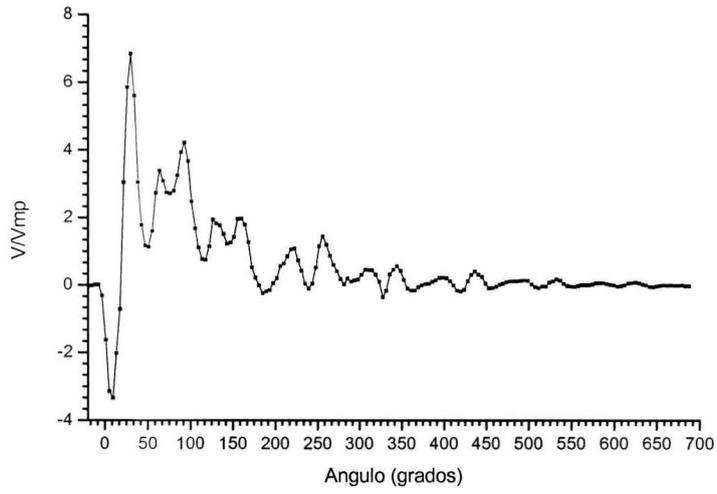


Figura 5.2. Velocidades para la posición (4,1), derivación A.

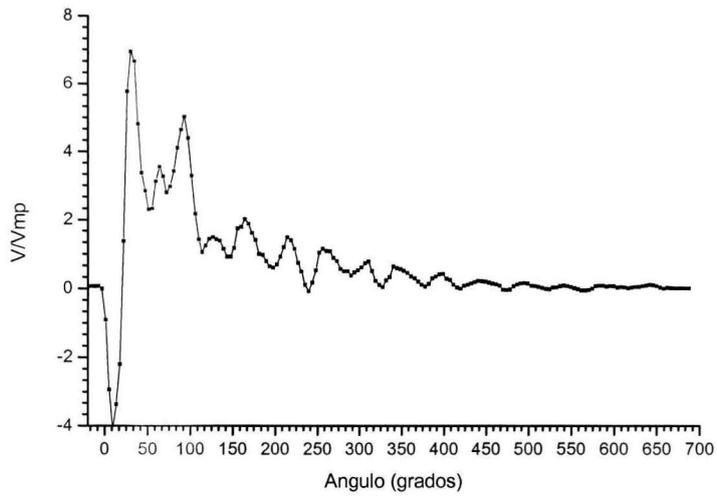


Figura 5.3. Velocidades para la posición (4,1), derivación B

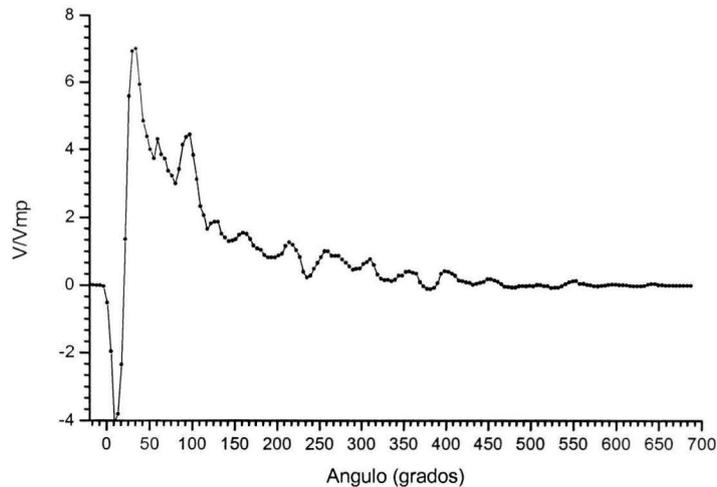


Figura 5.4.- velocidades para la posición (4,1), derivación C

En las tres gráficas se observa, al inicio, una región de velocidades negativas conformando un primer valle muy pronunciado, resultado del reflujo como se ha comentado en el capítulo IV. El reflujo inicia con la abertura de la válvula de admisión y alcanza su máxima magnitud para este punto a los 9 grados después del PMS, que vienen siendo 29 grados después del inicio del tiempo de admisión.

Después del reflujo, grados más adelante, aparecen crestas y valles en las gráficas, como resultado de la propagación y reflexión de ondas de presión. La primera cresta aparece a los 30 grados, con una velocidad máxima promedio de 7 veces la velocidad media del pistón. Después de esto siguen más valles y crestas; los primeros se localizan en 51, 80, 109 y 143 grados, en tanto que las últimas se localizan en 59, 93 y 122 grados respectivamente.

A pesar de la similitud que se observa en las tres primeras cresta, existe una pequeña diferencia entre las gráficas: las variaciones de velocidades en las primeras dos gráficas son más marcadas que en la tercera. Esta diferencia se debe a que al conectarse a la admisión del motor la derivación C, la aspiración queda más lejos del punto de medición

que cuando se conectan las otras dos derivaciones. La discrepancia disminuye cuando el punto de medición se acerca a la aspiración.

## 5.2.- MEDICIONES DE VELOCIDADES EN EL PLENUM.

En esta sección se presentan las gráficas de velocidades para los puntos representativos del plenum que se indican con un asterisco en la figura 5.5.

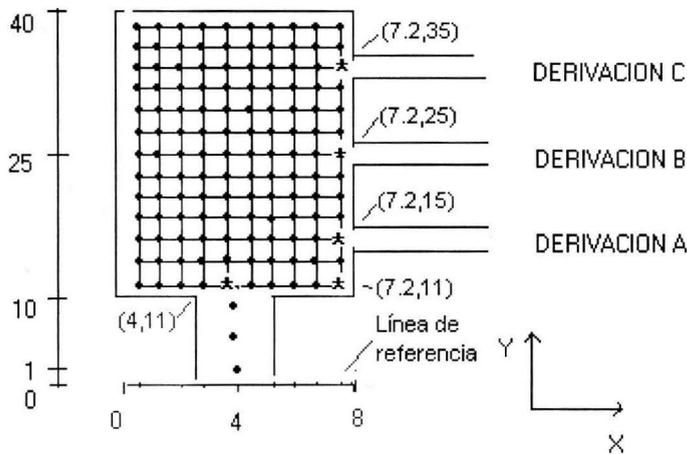


Figura 5.5 .- Puntos de medición en el plano central del cuerpo principal del plenum, se indican con un asterisco aquellos puntos representativos para los que se muestran las gráficas en esta sección.

Las figuras 5.6, 5.7, 5.8, y 5.9, presentan las gráficas de velocidades para el punto, (4,11). La figura 5.6 muestra la componente en la dirección X, con la derivación A conectada a la admisión del motor. En esta gráfica se observa una sola cresta que se localiza a los 30 grados de giro después del PMS rebasando un poco la velocidad media del pistón ( $V_p$ ); después de los 45 grados la magnitud de esta componente de la velocidad es muy baja. En los demás puntos de esta primera fila, la componente en X de la velocidad se incrementa cuando el punto de medición se acerca a la pared derecha, y disminuye cuando se acerca a la pared izquierda.

Cuando las otras derivaciones se conectan al motor, para el punto en cuestión, la componente en X es casi nula, por lo que no se ve la utilidad de presentar dichas gráficas.

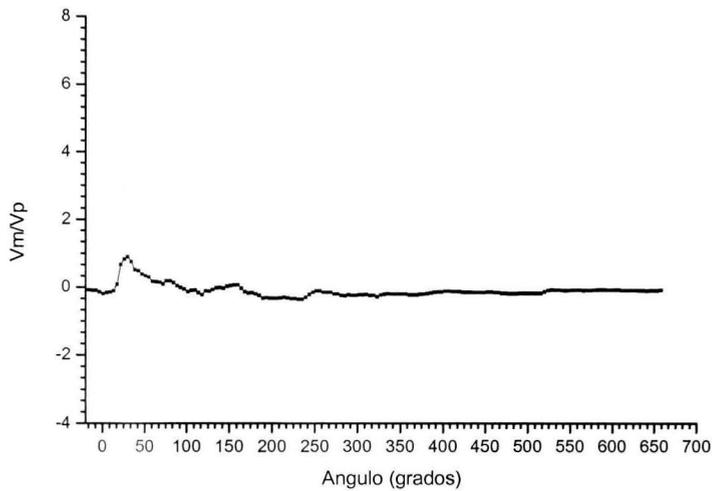


Figura 5.6.- Velocidades normalizadas para el punto (4,11), dirección X y derivación A.

La figura 5.7 presenta las velocidades en la dirección Y para el punto (4,11), con la derivación A conectada al motor. Se observa una gran semejanza entre esta gráfica y las obtenidas en la sección de entrada del plenum. El valle que se genera del refluo se localiza a los 9 grados, con una magnitud de la velocidad de -3 veces  $V_p$ , en tanto que la primera y la segunda cresta de mayor magnitud se localizan en 30 y 68 grados con magnitudes cercanas a los 5 y 4 veces  $V_p$ , respectivamente. El valle que se encuentra entre las dos crestas principales se localiza en 51 grados con magnitud de 1.5  $V_p$ . Después de estos aparecen oscilaciones más pequeñas, a causa de la onda de presión en el flujo, que se mantienen en casi todo el ciclo.

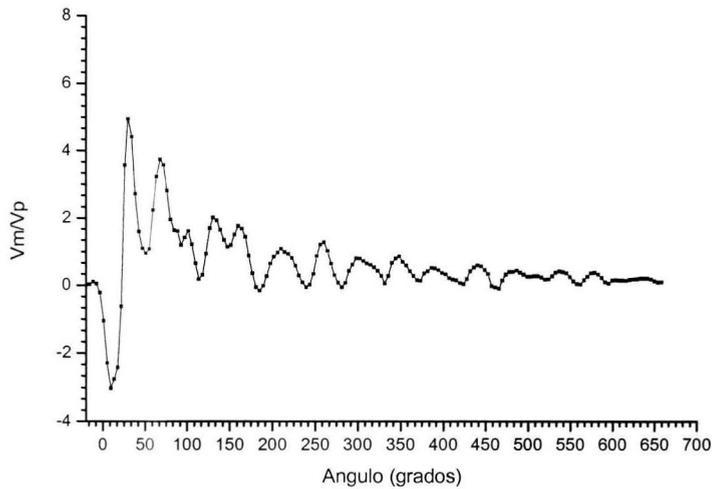


Figura 5.7.- Velocidades normalizadas para el punto (4,11), dirección Y y derivación A.

La figura 5.8 presenta la gráfica de velocidades en la dirección Y para el mismo punto (4,11), con la derivación B conectada al motor; esta gráfica es parecida a la 5.7 pero con magnitudes de velocidad relativamente mayores en el reflujos y menores en las crestas y valles, con la coincidencia en los mismos ángulos. Las pequeñas oscilaciones, después de las crestas principales, se disipan casi a la mitad del ciclo.

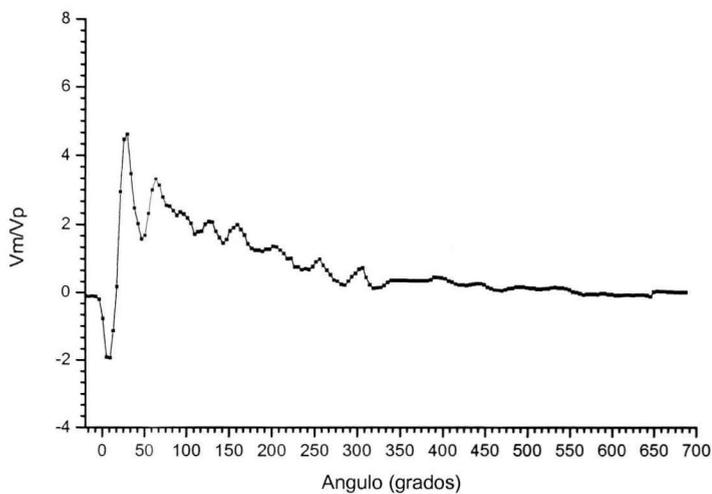


Figura 5.8.- Velocidades normalizadas para el punto (4,11), dirección Y y derivación B.

En la figura 5.9, para la derivación C conectada a la admisión del motor, la semejanza con las dos gráficas anteriores persiste al inicio de la admisión, alrededor de los 70 grados de giro. Grados más adelante la semejanza se pierde ya que después de la segunda cresta principal la gráfica sufre una declinación con pocas oscilaciones en lo que resta el ciclo. La tendencia que tienen las velocidades en esta gráfica se observa un poco en la figura 5.8, aunque en esta última las oscilaciones después de la segunda cresta son más marcadas.

En estas dos últimas gráficas las magnitudes de la velocidad disminuyen, como se esperaba, debido a la distancia a que se encuentra el punto de medición (4,11) de las derivaciones B y C.

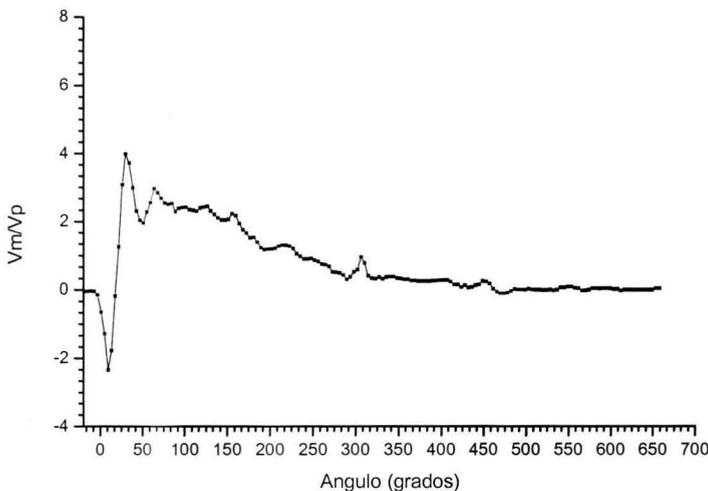


Figura 5.9.- Velocidades normalizadas para el punto (4,11), dirección Y y derivación C.

A continuación se presentan una serie de 4 gráficas para el punto (7.2,11). Como se ha comentado en párrafos anteriores, las velocidades de mayor magnitud en la dirección X se encuentran cerca de la pared derecha. En la figura 5.10 se muestra la componente en X para este punto. Comparada con la figura 5.6, se observa que dicha componente es mayor en la primera. Se nota además que en los puntos de esta fila, el reflujos no influye en la componente en X, pero en las dos filas posteriores sí se manifiesta dicho fenómeno

en esa dirección por la influencia que ejerce la aspiración, en este caso de la derivación A. Así como en el punto (4,11), las velocidades que se midieron en la dirección X para el punto (7.2,11) son casi nulas cuando las derivaciones B y C se conectan al motor.

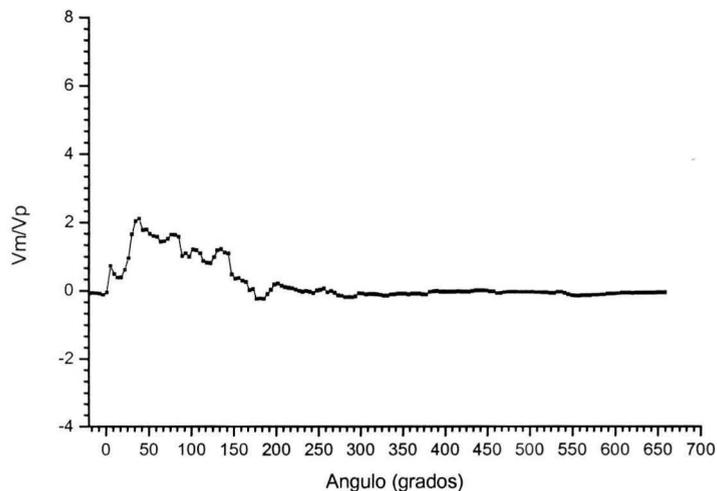


Figura 5.10.- Velocidades normalizadas para el punto (7.2,11), dirección X y derivación A.

La figura 5.11 presenta la componente de la velocidad en Y para el punto (7.2,11), con la derivación A conectada al motor. Se observan ciertas concordancias entre esta figura y la 5.7, en el ángulo al que se presenta el refluo, las crestas y los valles, además de la continuación de las oscilaciones de velocidades en casi en todo el ciclo del motor. A pesar de estas concordancias en el ángulo se observan diferencias en las magnitudes de las velocidades, en las formas de las crestas y en las oscilaciones, que son más pronunciadas en la figura 5.11. Las crestas principales presentan picos dobles en lugar de uno como en la figura 5.7. La naturaleza de esta gráfica se debe a su posición, en la esquina inferior derecha del modelo del plenum y también de su cercanía con la aspiración de la derivación A.

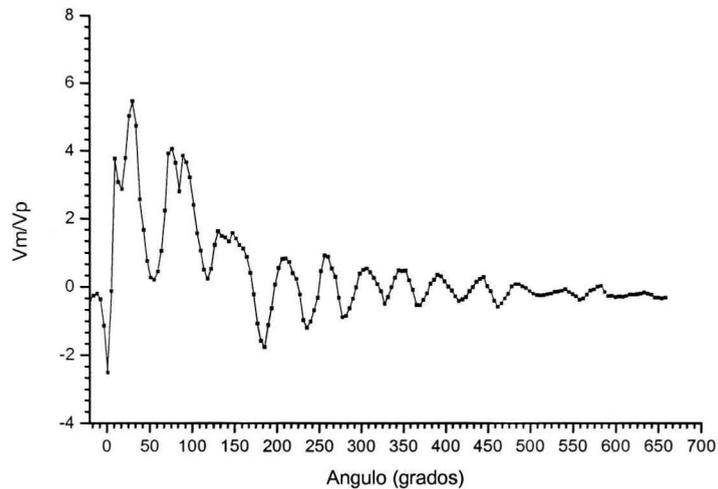


Figura 5.11- Velocidades normalizadas para el punto (7.2,11), dirección Y, derivación A.

La figura 5.12 presenta la componente en Y de la velocidad para el mismo punto (7.2,11), con la derivación B conectada al motor. Comparada con las figuras 5.8 y 5.11, se observa una disminución en la magnitud de la velocidad, aunque en la aparición del refluo, la primera cresta y el primer valle suceden casi en el mismo ángulo de giro. Las dos crestas en esta figura tienen magnitudes de velocidad cercanas, además la forma que presentan se parecen a una letra M; esta formación apareció ya en los resultados preliminares.

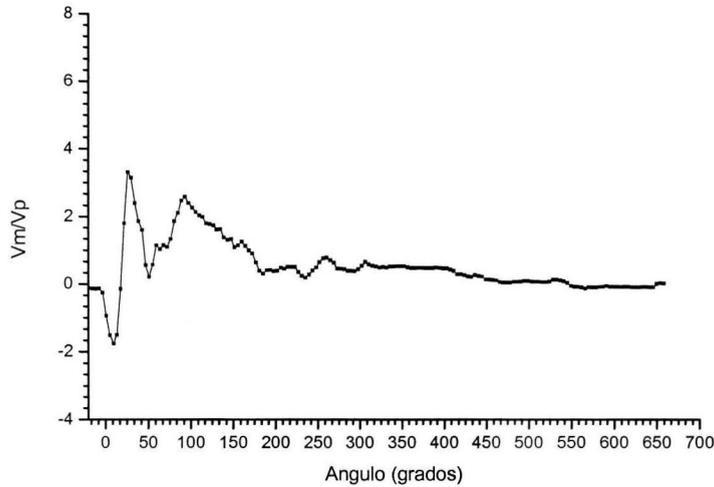


Figura 5.12.- Velocidades normalizadas para el punto (7.2,11), dirección Y, derivación B.

La figura 5.13 es la última de esta serie. Muestra la componente en Y de la velocidad, obtenidas en el punto (7.2,11), para el caso cuando la derivación C se conecta al motor. En esta gráfica no se observan crestas y valles muy marcadas, la magnitud de la velocidad máxima es de alrededor de 2 veces  $V_p$ , menor que la máxima que aparece en la figura 5.9. El refluo en este caso casi no se observa y su magnitud en valor absoluto es muy pequeña comparada con las demás gráficas.

Después de 160 grados de giro no existen oscilaciones de velocidades, el flujo empieza a estancarse rápidamente.

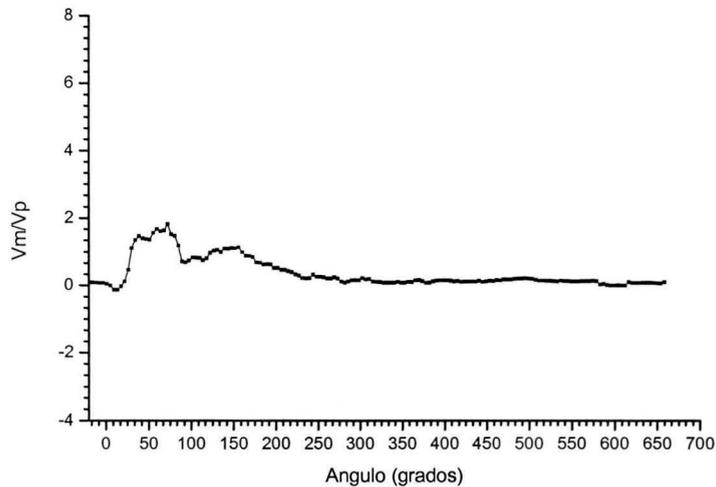


Figura 5.13.- Velocidades normalizadas para el punto (7.2,11), dirección Y, derivación C.

La última serie de 6 figuras presentan las componentes en X y Y de la velocidad para los puntos más cercanos a las derivaciones que se conectan una a la vez al motor. La figura 5.14 muestra la componente en X para el punto (7.2,15) que se encuentra a 0.8 cm de la entrada a la derivación A, conectado al motor en este caso. En esta gráfica el reflujó aparece alrededor de los 9 grados con -2 veces  $V_p$ , las dos crestas de magnitudes grandes aparecen alrededor de los 30 y 84 grados con velocidades de casi 5 veces  $V_p$ , respectivamente, en tanto que el valle que se encuentra entre las dos crestas aparece alrededor de los 63 grados, con una magnitud de 2 veces  $V_p$ . Se observa la forma de M que generan las dos crestas principales y el valle, similar a la que se obtuvo en las mediciones preliminares. Después de los 200 grados existen algunas pequeñas oscilaciones en la velocidad, coincidiendo con la terminación del proceso de admisión.

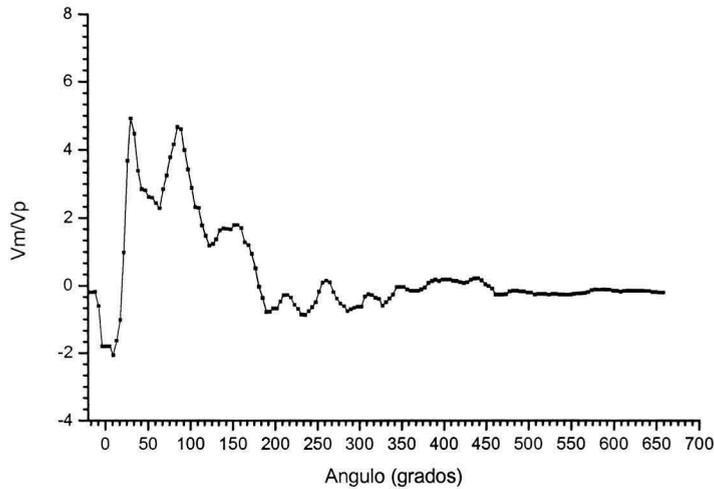


Figura 5.14.- Velocidades normalizadas para el punto (7.2,15), dirección X y derivación A.

La figura 5.15 muestra la componente en Y para este mismo punto. Se observa en la gráfica un reflujó que aparece en el PMS y a casi 1.5 veces  $V_p$ . También se observan dos crestas principales que se localizan alrededor de 30 y 101 grados con velocidades de alrededor de 4.5 y 3.7 veces  $V_p$ , respectivamente. Con respecto al valle principal, este se localiza alrededor de los 51 grados con casi cero veces  $V_p$ . Alrededor de los 200 grados de giro el flujo presenta una serie de oscilaciones pequeñas en lo que resta el ciclo del motor.

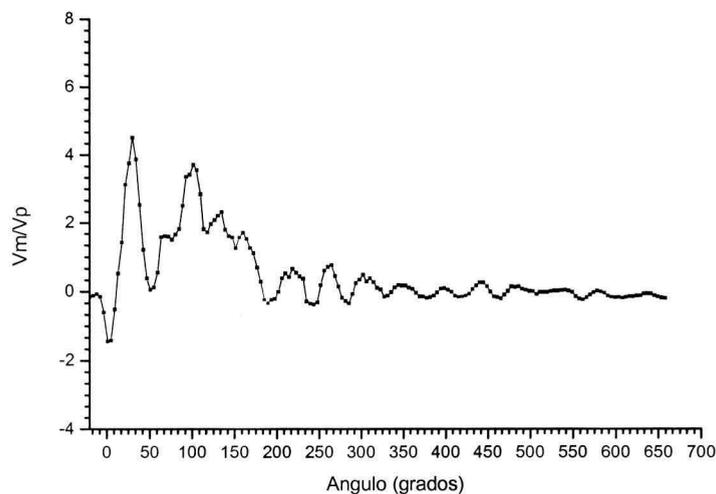


Figura 5.15.- Velocidades normalizadas para el punto (7.2,15), dirección Y, derivación A.

La figura 5.16 presenta la componente en X de la velocidad para el punto (7.2, 25) que se encuentra a 0.8 cm en el centro de la entrada del flujo a la derivación B. Esta gráfica muestra una gran semejanza con la de la figura 5.14 en casi todos los aspectos: ángulo de inicio del reflujó, las crestas, los valles, las magnitudes de la velocidad y el comportamiento del flujo después de terminar el proceso de la admisión y en todo lo que resta el ciclo del motor. Además de todas esas semejanzas, una vez más se genera la forma de M en la gráfica.

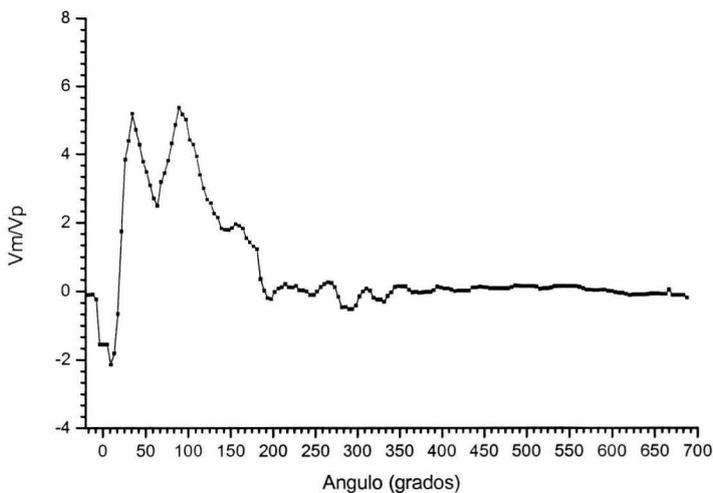


Figura 5.16.- Velocidades normalizadas para el punto (7.2,25), dirección X, derivación B.

La figura 5.17 muestra la componente en Y, para el mismo punto. La forma de la gráfica es diferente a la que se tiene en la figura 5.15, en ella aparece una sola cresta de velocidades de menor magnitud, el reflujó es menos pronunciado; después de lo que viene siendo un valle, el flujo se incrementa un poco para después empezar a disiparse sin oscilaciones en lo que resta el ciclo. La disminución de esta componente se debe a la influencia que ejerce la pared superior del plenum en el flujo, en esta dirección, cuando esta derivación B y la C se conectan al motor. Para el caso de la derivación A la influencia de la pared es nula, como se ha visto anteriormente, figura 5.15.

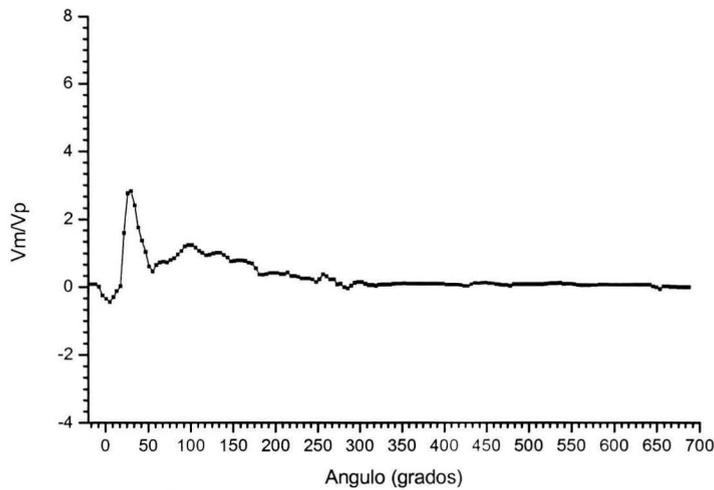


Figura 5.17.- Velocidades normalizadas para el punto (7.2,25), dirección Y, derivación B.

La semejanza que se tienen entre las figuras 5.14 y 5.16, reaparece nuevamente en la figura 5.18, que presenta la componente en X para el punto (7.2,35), con la derivación C conectada al motor. Los grados de aparición del reflujó, las crestas, el valle, las oscilaciones después de terminar el proceso de admisión y las magnitudes de las velocidades se mantienen casi iguales. Es de esperarse estas semejanzas en estos tres puntos ya que se encuentran en posiciones homólogas y el flujo es dominante en la dirección X.

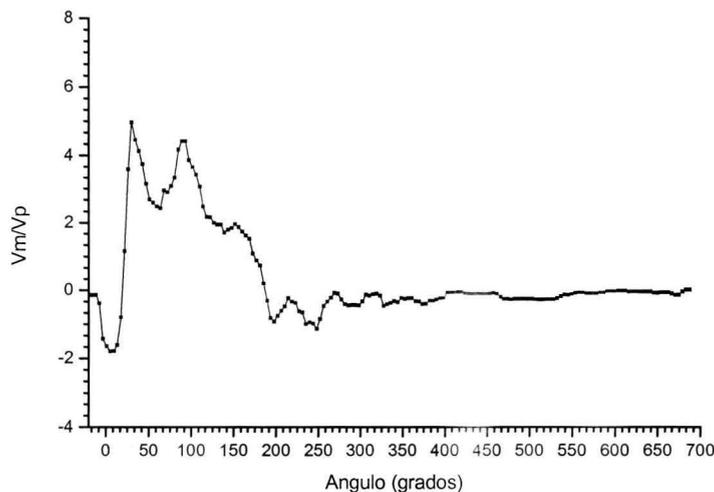


Figura 5.18.- Velocidades normalizadas para el punto (7.2,35), dirección X, derivación C.

La figura 5.19 corresponde a la componente en Y para el punto (7.2,35), con la derivación C conectada al motor. Esta gráfica no guarda ninguna relación con las otras dos de las figuras 5.15 y 5.17, ya que el reflujo no se presenta al inicio del ciclo, sino después de una pequeña cresta de velocidades de menor magnitud, aunque este reflujo tiene la misma magnitud que el de la figura 5.17. Grados más adelante el flujo ya no presenta ninguna oscilación de velocidades en lo que resta del ciclo. La componente en Y de la velocidad disminuye gradualmente al pasar de la derivación A a la derivación C. La figura 5.15 presenta magnitudes de velocidades mayores que las figuras 5.17 y 5.19, debido a que el flujo tiene más libertad de moverse hacia arriba, sin paredes superiores cercanas que influyan en él, y además el punto (7.2,11) se encuentra más cerca de la entrada al cuerpo del plenum que para los otros dos casos, por lo que estas características no se presentan cuando las derivaciones B y C se conectan al motor.

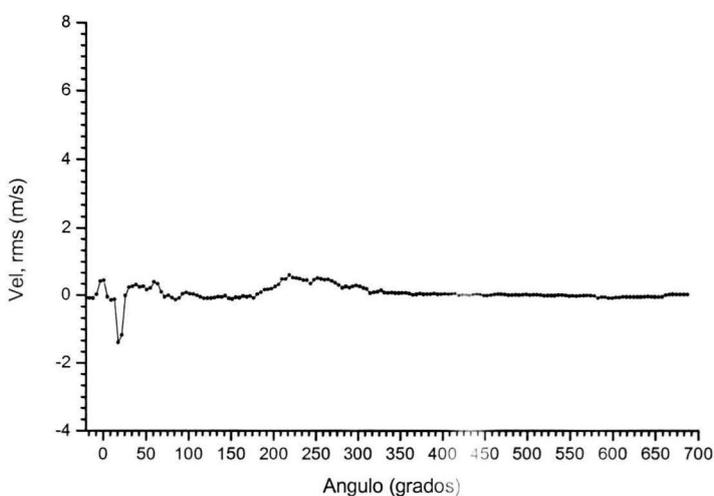


Figura 5.19.- Velocidades normalizadas para el punto (7.2,35), dirección Y, derivación C.

### 5.3.- CAMPO VECTORIAL DE VELOCIDADES EN EL PLANO CENTRAL DEL PLENUM.

En esta parte de la tesis se presentan los campos vectoriales de velocidades, generados de las mediciones de las dos componentes en X y Y, para los tres casos en que las derivaciones se conectan, una a la vez, al motor arrastrado. Los campos de velocidades mejoran la comprensión del comportamiento de flujo dentro del plenum.

Aunque se tienen campos de velocidades en todo el ciclo del motor, para cada 4.23 grados, lo que genera 170 campos en cada ciclo, aquí solo se presentan los correspondientes a algunos ángulos de giro del cigüeñal que son representativos. Sin embargo se anexa a la tesis un disco en el que se incluyen algunas animaciones en la que se muestra evoluciones de los campos de velocidades durante el ciclo completo del motor. Es de hacer notar que muchos de los detalles finos del flujo solo se aprecian en la animación y es difícil distinguirlos en las figuras de esta sección.

Se han seleccionado campos de velocidades para ángulos donde aparece el reflujo, el valle y las crestas principales, tomando como referencia las gráficas de velocidades puntuales de la sección anterior. Las figuras se presentan de tres en tres para cada ángulo seleccionado. Las figuras 5.20, 5.21 y 5.22 muestran los campos de velocidades a 0.93 grados de giro del cigüeñal para los casos cuando las derivaciones A, B y C se conectan una a la vez en la aspiración del motor, respectivamente. En estas figuras se observa que los vectores están saliendo de la derivación; este comportamiento es el que se aprecia en las gráficas de la sección anterior como el reflujo. Antes y después de este ángulo se observan pequeñas recirculaciones en la esquina inferior derecho del plenum. Las recirculaciones son más pronunciadas en el caso cuando la derivación A se conecta al motor y menos con las otras dos derivaciones, para este ángulo en particular.

En las figuras 5.20 y 5.21, después de dos filas arriba de las derivaciones A y B, respectivamente, ya no se aprecian vectores como en la figura 5.22. Esto es debido a la dificultad de medir las velocidades con el ALD, por la poca densidad de partículas

sembradas en esas regiones del plenum. Este es un problema común que surge en los experimentos utilizando ALD. Shaw et al. (47) tuvieron dificultades para medir en la región arriba de la aspiración de cada derivación, dentro de un modelo de plenum similar a la que se estudia en este trabajo.

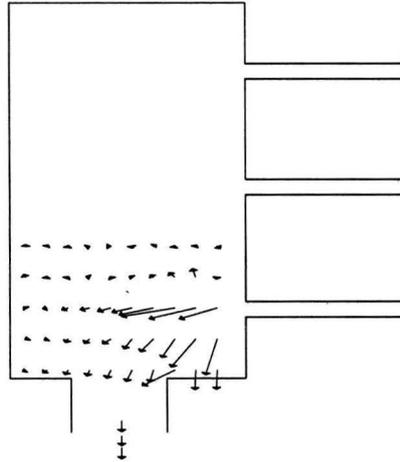


Figura 5.20.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal de 0.93 grados, para el caso cuando la derivación A se conecta al motor de CI.

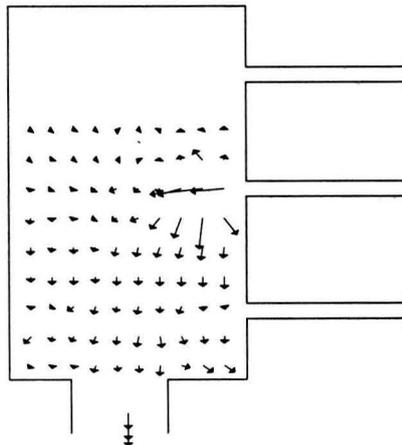


Figura 5.21.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal de 0.93 grados, para el caso cuando la derivación B se conecta al motor de CI.

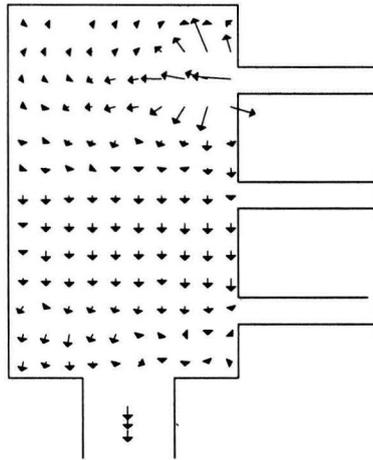


Figura 5.22.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 0.93 grados, para el caso cuando la derivación C se conecta al motor de CI.

Alrededor de los 9 grados persiste todavía el refluo y las recirculaciones en la esquina inferior derecha del modelo, para los casos en que se conectan las derivaciones A y B, figuras 5.23 y 5.24 respectivamente. Cuando se conecta la derivación C las recirculaciones suceden en las esquinas superior e inferior derechas del modelo (Ver animación). Así mismo, durante el periodo que dura el refluo, se generan pequeñas recirculaciones arriba y debajo de cada derivación, aunque en el caso de la derivación A casi no se observa dicho fenómeno.

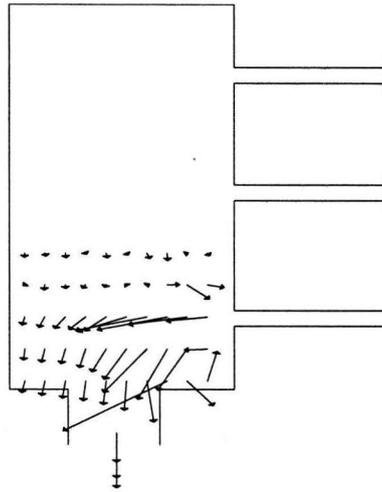


Figura 5.23.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 9.3 grados, para el caso cuando la derivación A se conecta al motor de CI.

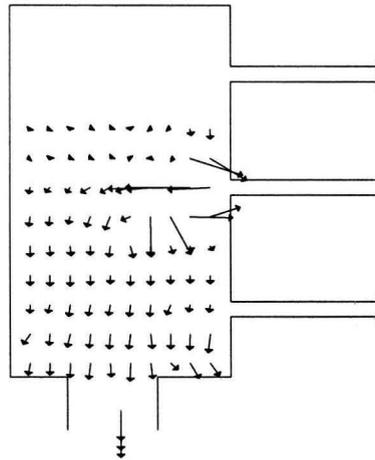


Figura 5.24.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 9.3 grados, para el caso cuando la derivación B se conecta al motor de CI.

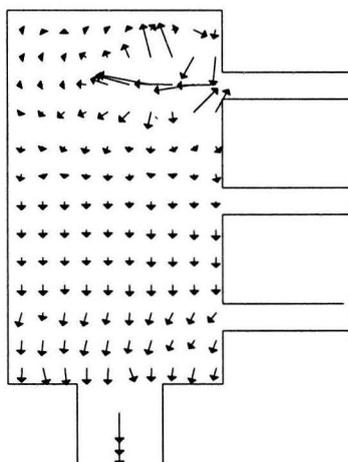


Figura 5.25.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 9.3 grados, para el caso cuando la derivación C se conecta al motor de CI.

Alrededor de los 30 grados se invierte el sentido de los vectores, ahora en dirección a las derivaciones, cuando se empiezan a generar las crestas y los valles. Las recirculaciones en las esquinas superior izquierda permanecen hasta grados más adelante, alrededor de los 55 grados (ver animación). Las figuras 5.26, 5.27 y 5.28, muestran el campo de velocidades para 30.2 grados de giro del cigüeñal, que es cuando aparece la primera cresta.

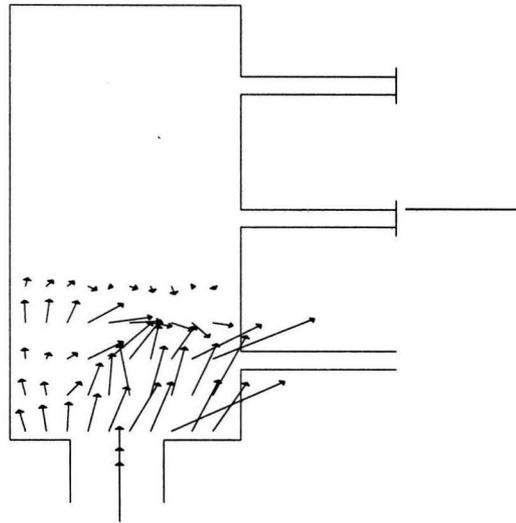


Figura 5.26.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 30.2 grados, para el caso cuando la derivación A se conecta al motor de CI.

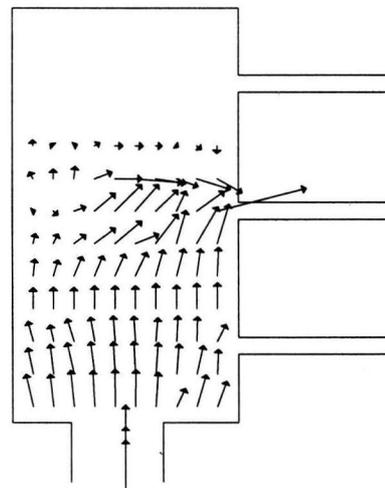


Figura 5.27.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 30.2 grados, para el caso cuando la derivación B se conecta al motor de CI.

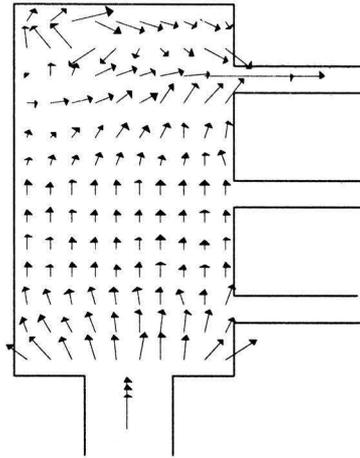


Figura 5.28.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 30.2 grados, para el caso cuando la derivación C se conecta al motor de CI.

Cerca de los 63 grados, la entrada del flujo a la derivación es retardada por una onda de presión, lo que hace que las magnitudes de los vectores disminuyan marcadamente, figuras 5.29, 5.30 y 5.31. La recirculación en la esquina superior derecha se ha disipado, para el caso cuando se conecta la derivación C, como se ve en la figura 5.31. Por el contrario en los casos de las derivaciones A y B se desarrollan recirculaciones en las esquinas inferior izquierda y derecha, cerca de la entrada del flujo en el modelo (ver animación).

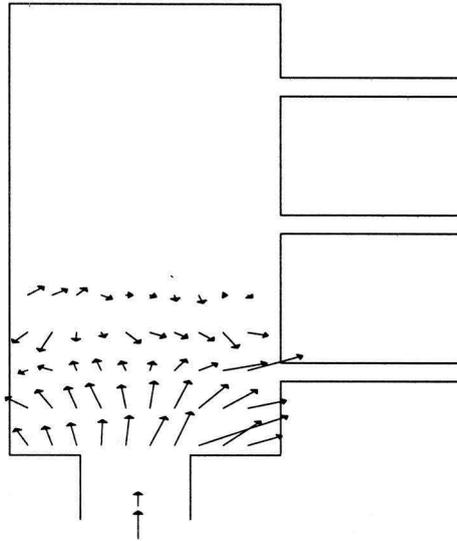


Figura 5.29.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 63.7 grados, para el caso cuando la derivación A se conecta al motor de CI.

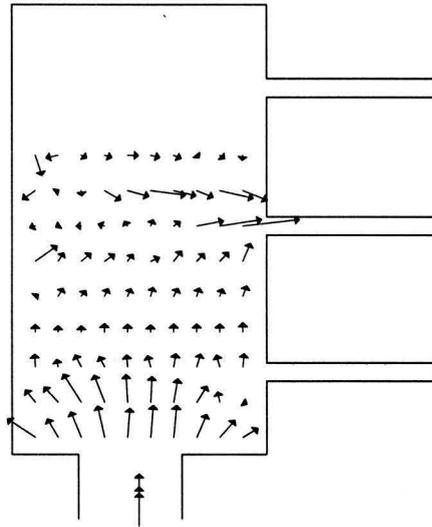


Figura 5.30.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 63.7 grados, para el caso cuando la derivación B se conecta al motor de CI.

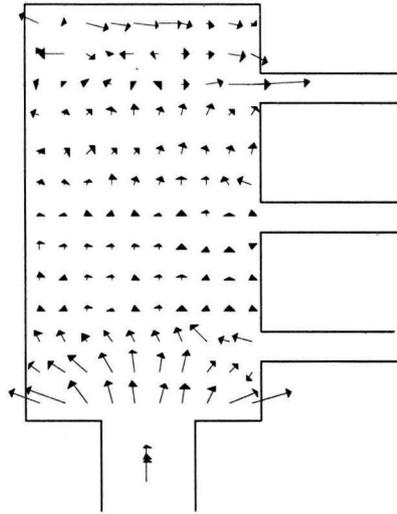


Figura 5.31.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 63.7 grados, para el caso cuando la derivación C se conecta al motor de CI.

Después de la segunda cresta, alrededor de 84.65 grados, figuras 5.32, 5.33 y 5.34, las magnitudes de los vectores disminuyen y las recirculaciones se disipan en las esquinas. Grados más adelante el flujo es perturbado por pequeñas oscilaciones originadas por las reflexiones de la onda de presión, onda que se van disipando durante todo el ciclo, que se manifiesta en la disminución de las magnitudes de los vectores.

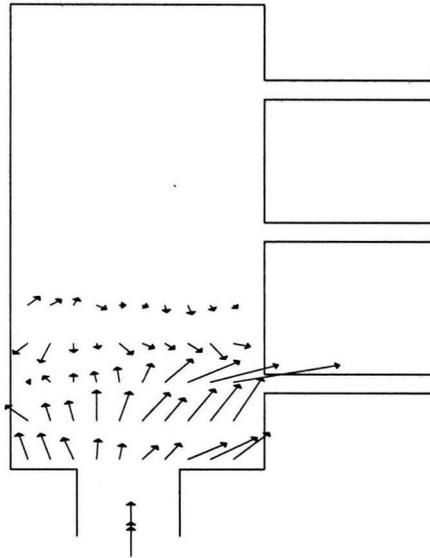


Figura 5.32.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 84.65 grados, para el caso cuando la derivación A se conecta al motor de CI.

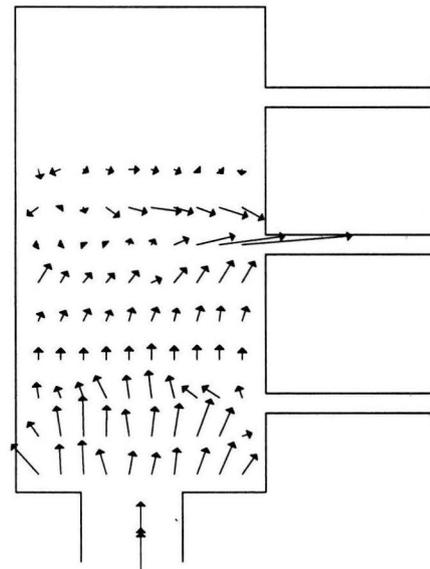


Figura 5.33.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 84.65 grados, para el caso cuando la derivación B se conecta al motor de CI.

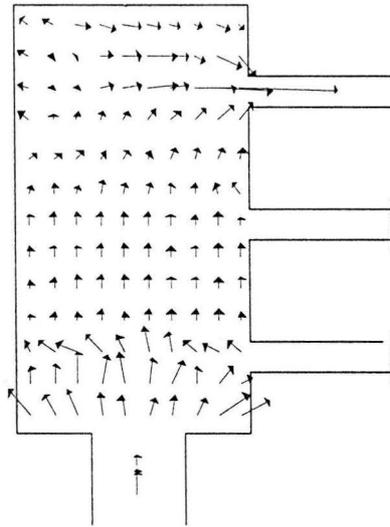


Figura 5.34.- Campo de velocidades para un ángulo de giro del cigüeñal a 84.65 grados, para el caso cuando la derivación C se conecta al motor de CI.

#### 5.4.- COMENTARIO FINAL

Como se ha visto en este capítulo, el campo vectorial de velocidades es una herramienta que ayuda a la comprensión del flujo dentro del modelo del plenum. La importancia que tiene este tipo de representación es que con ella se pueden localizar dentro del plenum zonas de recirculaciones, como las localizadas en las esquinas y cerca de la entrada del flujo en los corredores. Como es bien conocido, las recirculaciones generan pérdidas de energía en el flujo, por lo que las que se generan en el modelo, disipan parte de la energía que pudiera servir para impulsar el flujo de aire dentro de los corredores del sistema de admisión.

Como se ha comentado en el capítulo II, el plenum en cuestión, es un modelo simplificado de forma rectangular, que según el análisis del flujo hecho en este trabajo, está muy lejos de tener una forma óptima debido a la gran disipación de energía en las esquinas.

La influencia de la onda de presión sobre el flujo también se puede observar mediante el campo vectorial de velocidades, y se manifiesta como incrementos y decrementos oscilatorios en la velocidad. Así mismo el reflujó del cilindro al modelo se observa como una disminución pronunciada de la velocidad al inicio del proceso de admisión.

Por otro lado, los datos obtenidos en los experimentos de este trabajo, se pueden utilizar como validación o como condiciones de fronteras o iniciales de códigos numéricos en simulaciones de flujos en recintos similares..

## VI.- CONCLUSIONES

Las mediciones de las componente de la velocidad en dos direcciones hechas con el anemómetro laser Doppler, se presentan en gráficas de velocidad contra ángulo de giro para cada punto de la malla de medición y por medio de los campos de velocidades para el plano central del plenum completo para cada 4.23 grados de giro en todo el ciclo del motor. Las gráficas y los campos de velocidades se obtienen para cada derivación conectada a la admisión del cilindro de un motor de combustión arrastrado por medio de un motor eléctrico de 1 Hp de potencia, que gira a 725 rpm. Todas las gráficas se presentan en función del ángulo de giro del cigüeñal y normalizadas con respecto a la velocidad media del pistón.

Las mediciones revelan los siguientes aspectos:

- 1.- Al inicio del ciclo, - 20 grados APMS, existe un reflujo en el plenum que llega a su punto máximo alrededor de los 9 grados DPMS, debido a que al abrirse la válvula de admisión el pistón sigue su ascenso hacia el PMS y existe una diferencia de presiones entre el plenum y el cilindro.
- 2.- En el reflujo se observaron pequeñas recirculaciones arriba y debajo en la salida del flujo para cada derivación
- 3.- Después de los 9 grados, el sentido de la circulación se invierte, llegando a una máxima velocidad alrededor de los 30 grados, en la mayoría de los puntos.
- 4.- El cambio en el sentido del flujo, cuando termina el reflujo y comienza la aspiración en la derivación, es muy rápido.
- 5.- El campo de flujo en la sección de la entrada del plenum es unidireccional.
- 6.- La expansión del flujo al pasar de la entrada al cuerpo del modelo, genera recirculaciones en las esquinas inferior izquierda y derecha, predominando en esta última.
- 7.- En la región cercana a la entrada de los corredores se generan recirculaciones generadas por el reflujo y así mismo por la aspiración de la derivación. Estas últimas

recirculaciones fueron vista por Shaw et al. en el estudio experimental estacionario que hicieron en un modelo similar.

8.- Cuando la derivación C se conecta al motor también se generan recirculaciones en las esquinas superior izquierda y derecha, predominando en la primera.

9.- Alrededor de los 63 grados se observa una disminución de las magnitudes de las velocidades causada por la influencia de una onda de rarefacción que se genera en la válvula al inicio de la admisión.

10.- Existe cierta dificultad para sembrar suficientes partículas en la región aguas arriba de la zona de aspiración, cuando la derivación A se conecta al motor y ese mismo problema surge en la zona central del plenum cuando las otras dos derivaciones se conectan.

11.- Después de los 200 grados de giro, que coincide con la terminación del proceso de admisión, surgen una serie de oscilaciones de velocidades pequeñas debido a la transmisión y reflexión de la onda de presión dentro de los conductos, manteniéndose en casi todo el ciclo.

12.- El sensor óptico que se utiliza por primera vez en este tipo de mediciones, para indicar el PMS del pistón funciona satisfactoriamente.

13.- Finalmente después de muchos esfuerzos para montar el arreglo experimental, adecuar el sensor óptico al sistema, debido a problemas de electrónica, el anemómetro láser Doppler del laboratorio de Termofluidos de la FI-UNAM, demostró ser una herramienta muy útil para el estudio de flujos transitorios relativamente complejos.

## REFERENCIA

- 1.- Aldo Coghe and L. Ferri D.A., "In-cylinder air motion measurements by laser velocimetry under steady state flow conditions", SAE 850123, 1985, pp. 1735-46
- 2.- Arcoumanis, C. and Flamang, P., "Flow in the inlet manifold of a production diesel engine", Proc. Instn. Mech. Engrs, vol. 203, parte C, 1989, pp 39-49.
- 3.- Arcoumanis, C. and J.H. Whitelaw, "Fluid mechanics of internal combustion engine -a review", Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 201, no. c1, 1987, pp 57-74.
- 4.- Asanuma T. And Obokata T., "Gas velocity measurements of a motored and firing engine by Laser Anemometry", SAE 790096, 1980, pp.401-409.
- 5.- Azoury, P.H., "Pressure-wave utilization in reciprocating engine manifolds", Engineering applications of unsteady fluid flow, Wiley, 1990, pp 165-221.
- 6.- Banisoleiman, K. and French, B.A., "The interaction of diesel engine turbocharging and tuned inlet manifold systems under steady state and transient operation", Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 205, parte A, 1991, pp 269-281.
- 7.- Belmabrouk H. And M. Michard, "Taylor length scale measurement by LDV", Experiments in fluids, no. 25, 1998, pp 69-76.
- 8.- Benson, R. S., "The Thermodynamic and gas dynamic of internal combustion engine", Clarendon Press, Oxford, Vol. I, 1982.

- 9.- Horlock, J.H., and Winterbone D.E., "The Thermodynamic and gas dynamic of internal combustion engine, Clarendon Press, Oxford, Vol. II, 1982.
- 10.- Bingham J. F., "An improved branched pipe model for multi-cylinder automotive engine calculations", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol., 199 no. D1, 1995, pp 65-67
- 11.- Brehem, C. and Whitelaw, J.H., " Air and Fuel: Characteristics in a spark-ignition engine", Automotive Engineering International, January 2000, pp 135-138.
- 12.- Brown, C.N. and Ladommatos N., "A numerical study of fuel evaporation and transportation in the intake manifold of a part- injected spark-ignition engine", Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 205 part D., 1991, pp 161-175.
- 13.- Bulaty T. and H. Niessker, "Calculation of 1D unsteady flows in pipe systems of I.C. engines", Transactions of the ASME, Journal of fluids engineering, vol. 107, 1985, pp 407-412.
- 14.- Catania, A. E. and A. Mittica, "Induction system Effects on small-scale turbulence in a high-speed Diesel Engine", Trans. ASME, vol. 109, 1987, pp 491-502.
- 15.- Catania A. E. and A. Mittica, "Extraction techniques and analysis of turbulence quantities from in-cylinder velocity data", Trans. ASME, vol. 111, 1989, pp. 466-478.
- 16.- Chandrasekaran, D., Mohan K., V. Ganesan and P. Srinivasa R., "An experimental investigation of flow parameters inside spherical swirl pre-chamber of a diesel engine under motoring condition", Experiments in fluids 24, 1998, pp. 462-469.

- 17.- Chappuis , S., B. Cousyn, M. posylkin, F. Vannobel and J. H. Whitelaw, “ Effects of injection timing on performance and droplet characteristics of a sixteen-valve for cylinder engine”, Experiments in fluids, vol. 22, 1997, pp 336-344.
- 18.- Che Wun Hong and Gia-Hong Huang, “Numerical heat transfer”, part A, Vol. 32, 1997, pp 769-785.
- 19.- Desantes J.M., J. Benajes, J. Urchueguia, “Evaluation of the non-steady flow produced by intake ports of direct injection Diesel engines”, Experiments in fluids 19, 1995, pp. 67-60.
- 20.- Durst F., K, Fukui, J.C.F. Pereira, “Fluid Dynamically caused cycle- to- cycle variations in piston-driven pipe expansion flows”, Experiments in fluids, vol. 13, 1992, pp 1-10.
- 21.- Durst F., Maxworthy T., and Pereira J.C.F., “ Piston -driven, unsteady separation at a sudden expansion and LDA measurement”, Phys. Fluids, part A1, vol. 7, 1989, pp 1249-1260.
- 22.- Enotiadis A.C., C. Vafidis and J.H. Whitelaw, “Interpretation of cyclic flow variations in motored internal combustion engines”, Experiments in fluids 10, 1990, pp 77-86.
- 23.- Fu H., M.J. Tindal, A.P. Watkins, and M. Yianneskis, “Computation of three-dimensional turbulent flows in a pipe junction with reference to engine inlet manifolds”, Proc. ImechE, vol. 206, part C, 1992, pp. 285-296.
- 24.- Gasparetti, M. , Paone, N. and Tomassini, “Laser Doppler technique for the combined measurement of inlet flow and valve motion in IC engines” , Measurements science and technology, v7, n4, 1996, pp 576-591.

- 25.-** Glenn P. S., “Noise optimization of air-intake manifold”, Automotive Engineering International, October 1998, pp. 85-87.
- 26.-** He, S. and Jackson, J.,D., “A study of turbulence under conditions of transient flow in pipe”, J. Fluid Mech., vol. 408, 2000, pp 1-38.
- 27.-** Heywood, J.B., “Internal combustion engine fundamentals”, Mc. Graw Hill, New York, 1988.
- 28.-** Hino Mikio, K. Nakayama, and A. Harat, “ Experiments on the turbulence statistics and the structure of a reciprocating oscillatory flow”, J. Fluid Mech., vol.131, 1983, pp. 363-400.
- 29.-** Hong C. W. And D.G. Chen, “Direct measurement of in cylinder integral length scales of a transparent engine”, Experiments in fluids 23, 1997, pp 113-120.
- 30.-** Johnen, M.T. And M. Haug, “Spray formation and fuel film development measurements in the manifold of an SI engine”, Proc. for dedicated conference on the motor vehicle and the environments demands of the nineties and beyond, ISATA 27, 1994, pp. 201-209.
- 31.-** Kuo, T.W., Chang, S., “Three-dimensional computations of flow and fuel injection in an engine intake port”, Trans. Of the ASME, Journal of engineering for the gas turbines and power, vol. 113, 1991,pp. 427-432.
- 32.-** Lehmann B. and J. Mante, “A two- component Laser- Doppler scanning technique for the analysis of unsteady flow field and turbulent structures”, Experimental thermal and fluid science, vol. 9, 1994, pp 111-118.

- 33.-** Liou T. M. and Santavicca, D.A., "Cycle Resolved LDV Measurement in a motored IC Engine", Trans. ASME, vol. 107, 1985, pp 232-240.
- 34.-** Liu H.Q., Cahlhoub N.G., Herein N. "Simulation of a single cylinder Diesel Engine under cold start conditions using simulink", Trans. ASME, vol. 123, 2001, pp 117-124.
- 35.-** Mario Amelio, Sergio Bova and Carmine De Bartolo, "The separation between turbulence and mean flow in ICE LDV data: The complementary point-of-view of different investigation tools" Trans. ASME, vol. 122, 2000, pp 579-587
- 36.-** Michal Dyer and Peter O. Witze, "LV measurements in a constant volume internal combustion engine simulator", Edited by H.D. Thompson and W. H. Stevenson, Hemisphere, 1979, pp. 267-270.
- 37.-** Miyano, T. and Hubbard M., "Internal combustion engine intake manifold aspiration dynamics", Trans. of the ASME, Journal of dynamic systems measurement and control, vol. 112, 1990, pp 596-603.
- 38.-** Payri F., J.M. Desantes and J.V. Pastor, "LDV measurements of the flow inside the combustion chamber of 4-valve D.I. diesel engine with axisymmetric piston-bowls", Experiments in fluids 22, 1996, pp. 118-28.
- 39.-** Peter O. Witze, "Application of laser velocimetry to a motored internal combustion engine", Edited by H.D. Thompson and W.H. Stevenson, Hemisphere, 1979, pp. 239-50.
- 40.-** Peter O. Witze, "A critical comparison of hot-wire anemometry and laser Doppler velocimetry for I.C. engine applications", SAE 800132, 1980, pp. 711-39.

- 41.- Peter O. Witze, "Application of LDV to spark-ignition engines", *Flow Lines*, summer 1989, pp. 3-9.
- 42.- Posilkin, M., Taylor, A.M.K.P. and Whitelaw, J.H., "Manifold injection and the origin of droplets at the exit of an inlet valve", Edited by Springer, 1995, pp. 132-146.
- 43.- Ravi Sankar, S., K. Nandakumar, and J.H. Masliyah, "Oscillatory flows in coiled square ducts", *Phys. Fluid*, Vol. 31(6), 1988, pp 1348- 1359.
- 44.- Rodney B, Rask, "Velocity measurements inside the cylinder of a motored internal combustion engine", Third International Workshop on laser velocimetry, 1978, pp.251-260.
- 45.- Rodney B, Rask, "Laser Doppler Anemometer measurements in an internal combustion engine", SAE 790094, 1979, pp.371-382.
- 46.- Shaw C.T., D. J. Lee, S.H. Richardson and S Pierson, "The flow through a plenum-runner system—a comparison of experiment and computation", *Proc. ImechE*, vol 215, part C, 2001, pp.943-953
- 47.- Shaw C.T., D. J. Lee, S.H. Richardson and S Pierson, "Measurement the flow through a model engine inlet system containing a plenum and runners", *Proc. ImechE*, vol. 215, part C, 2001, pp 955-964.
- 48.- Shemer, L. Wignanski, I and E. Kit, "Pulsating flow in a pipe", *J. Fluid Mech.* vol. 153, 1985, pp 313-337.

- 49.-** Sierens R., P. Snauwaert, “Study of the flow Pattern in compact manifold type junction by LDA”, Trans. ASME, vol. 109, 1987, pp. 452-458.
- 50.-** Taghavi R., A. Dupont, “Investigation of the effect of Inlet port on the flow in combustion chamber using multidimensional modelling”, Trans. ASME, vol. 111, 1989, pp. 479-489.
- 51.-** Thompson and Gong., C. “Intake manifold modeling for the fuel metering control of spark ignited engines”, Trans. of the ASME, Journal of dynamics systems measurements and control, vol. 119, 1997, pp 569-573.
- 52.-** Weclas, M., A. Melling and F. Durst, “Combined application of surface flow visualization and laser Doppler anemometry to engine intake flow”, Experiments in fluids, vol. 15, 1993, pp. 323-331.
- 53.-** White, F.M., “Fluid Mechanics”, third edit., Mc Graw Hill, 1994.
- 54.-** White, F,M, “Viscous Fluid Flow”, Second edition, Mc. Graw Hill, pp 474.
- 55.-** Wigley G. And M.G. Hawkins, “Three dimensional velocity measurements by laser anemometry in a diesel engine cylinder under steady state inlet flow conditions”, SAE 780060, 1978, pp. 178-86.
- 56.-** Wolf-D. Bauer, J. Wensch, John B. Heywood, “Averaged and time-resolved heat transfer of steady and pulsating entry flow in intake manifold of a spark-ignition engine”, International Journal of heat and fluid flow, no. 19, 1998, pp. 1-9.

**57.-** Yeoman, M.L. and Taylor, A., "Velocity measurements in the manifold of an internal combustion engine", Edited by H. D. Thompson and Warren Stevenson, Hemisphere publishing, 1978, pp 261-266.

**58.-** Zhao, Y., Winterbone, D.E., " A study of multidimensional gas flow in engine manifolds", Proc. Instn. Mech. Engrs vol. 208, part D,, 1994, pp 139-145.