



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

1173
10

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

AERODINAMICA DE CHORROS PLANOS
PARALELOS EN COFLUJO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA MECANICA
AREA: TERMOFLUIDOS
P R E S E N T A
ING. JUAN CARLOS SERRANO GARCIA

DIRECTOR DE TESIS: DR. FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ



MEXICO, D. F.

AGOSTO DE 2003

TEMA CON
FALLA DE ORIGEN



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.

**Dedicada a mi Madre:
Sra. Paulina García Canales**

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo ocupacional.

NOMBRE: Juan Carlos Serrano García

FECHA: 29 de agosto de 2003.

FIRMA: 

TRABAJOS
FALLA DE ORIGEN

**Doy las gracias a mi Madre,
por el estímulo, apoyo y libertad.
Cuyo cariño siempre ha estado
presente en mi vida...**

**Juan Carlos Serrano García
México, D. F.,
a 22 de Junio de 2001.**

FALLA DE ORIGEN

Dedicación

A mi madre

Quiero con mi dedicación, cariño

y apoyo, ser realmente alguien alguna.

Que ha convertido ruidosamente en persona de prestigio.

Apoyándose al logro de una meta real.

mi Maestra.

Por compartir, trabajar y alegrías.

Amor y fracasos, por todos los detalles que me ha

brindado durante toda mi vida

como educadora y ser humano.

de mí lo que soy.

! Gracias !

! Muchas Gracias !

Juan Carlos

ESTE COPY
TALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, que ha hecho en mi favor cosas grandes y maravillosas, **Gracias**.

A mis hermanas Lic. **MARÍA ALEJANDRA SERRANO GARCÍA**, Lic. **MARÍA NGÉLICA SERRANO GARCÍA** y Dra. **MARÍA BLANCA SERRANO GARCÍA**, por su cariño y apoyo fraternal, así como sus oraciones y alicientes que en todo momento han estado conmigo, desde que inicie hasta que concluí la Maestría, **Gracias**.

A mi cuñado Sr. **JESÚS MAYA URIZA**, por los momentos tanto de apoyo moral como motivaciones que en todo momento he escuchado de él, **Gracias**.

A una persona muy especial que cambió mi vida en un momento, haciéndome reír, llorar y sobre todo soñar, Sra. **MARÍA CLAUDIA CASAS VELÁZQUEZ** y sirvió como motor en esta etapa final de la Maestría, **Gracias**.

Dr. **FRANCISCO SOLORIO ORDAZ**, por haberme dado la oportunidad de poder realizar y culminar uno de mis grandes sueños, la Maestría, gracias por haberme brindado su apoyo incondicional y por ayudarme a encauzar mi formación profesional, por la calma, asistencia continua, sus valiosas aportaciones durante todo el curso de este trabajo y motivación constante, **Gracias**.

A los señores Dr. **JAIME CERVANTES DE GORTARI**, Dr. **FEDERICO MÉNDEZ LAVIELLE**, Dr. **RUBÉN ÁVILA RODRÍGUEZ** Y Dr. **ALEJANDRO ROMERO LÓPEZ**, por el tiempo que dedicaron a la revisión de mi tesis y el haber aportado valiosos comentarios y consejos a este trabajo, con el fin de crear y desarrollar este espíritu de profesionalismo, **Gracias**.

Ing. **SANTIAGO RIVAS GÓMEZ**, por creer en mí y, especialmente, por brindarme la oportunidad de poner en práctica mis conocimientos profesionales, así como las facilidades otorgadas para concluir e iniciar una nueva etapa profesional, **Gracias**.

Al **DEPARTAMENTO DE TERMOENERGÍA Y MEJORAMIENTO AMBIENTAL, ÁREA INVESTIGACIÓN**, por permitirme desarrollar los conocimientos de este trabajo, **Gracias**.

Especialmente a los Sres. Laboratoristas **DANIEL RAMÍREZ ANDRADE** y **FERNANDO GALÁN VITAL**, por su valioso apoyo en la realización de esta tesis, **Gracias**.

Sra. **CONCEPCIÓN CORTÉS FLORES**, por darme su amistad y aliciente en este trabajo, **Gracias**.

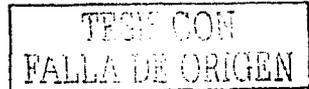


A todos los **RESPONSABLES DE LAS DIFERENTES AREAS ORGANIZACIONALES DE LA DIVISI3N DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA**, por la atenci3n y la informaci3n proporcionada para la realizaci3n del presente trabajo. **Gracias.**

En especial, deseo expresar mi agradecimiento al **CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA, CONACyT**, por el apoyo proporcionado para la realizaci3n de esta maestría a trav3s de la beca n3mero 118359. **Gracias.**

De una manera muy particular quiero dar las gracias al **INSTITUTO MEXICANO DEL PETR3LEO**, el cual de alguna manera contribuy3 al desarrollo y conclusi3n de esta etapa, junto con todas las personas que me distinguieron con su amistad en dicha instituci3n. **Gracias.**

Ing. Juan Carlos Serrano García



ÍNDICE

VII

Nomenclatura		XI
Prólogo		XIII
Capítulo 1	Introducción	1
1.1	Importancia del estudio de los chorros	1
1.2	Objetivos del presente trabajo	9
Capítulo 2	Antecedentes	12
2.1	Conceptos fundamentales	12
2.1.1	Clasificación	12
2.1.2	Nomenclatura	14
2.2	Perfiles de velocidad media típicos de un chorro libre	17
2.3	Antecedentes bibliográficos	20
2.4	Justificación del presente trabajo	28
Capítulo 3	Arreglo experimental y metodología utilizada	29
3.1	Planteamiento del problema	29
3.2	Descripción del equipo diseñado y sistema de medición	30
3.3	Calibración de la sonda de hilo caliente	41
3.4	Metodología empleada en la experimentación	50
3.5	Pruebas de aceptación del equipo diseñado	52
Capítulo 4	Resultados experimentales	56
4.1	Validación del equipo diseñado	59
4.2	Perfiles de velocidades medias y fluctuantes de las diferentes tasas de velocidad media	65
4.3	Análisis del semiancho del chorro	81
4.4	Efecto de la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro	82
Capítulo 5	Conclusiones y recomendaciones	84
5.1	Conclusiones	84
5.2	Sumario de resultados	92
5.3	Recomendaciones para trabajos futuros	94

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

	Índice	VIII
Referencias		96
Apéndice A	Diseño y construcción del equipo experimental	102
Apéndice B	Descripción y funcionamiento del anemómetro de hilo caliente	109
B.1	Introducción	109
B.2	Sondas	110
B.2.1	Sensores de hilo caliente	110
B.2.2	Características de calibración	111
B.3	Circuitos de control	112
B.3.1	Anemómetro de corriente constante	112
B.3.2	Anemómetro de temperatura constante	113
B.3.3	Comparación entre sistemas de anemometría	115
Apéndice C	Cálculo de los valores del número de Reynolds	117
C.1	Cálculo de los valores del número de Reynolds correspondientes a las pruebas de aceptación del equipo diseñado	118
C.2	Cálculo del valor del número de Reynolds medido a la salida del chorro solo	120
C.3	Cálculo de los valores del número de Reynolds correspondientes a las diferentes tasas de velocidad media	121

RESUMEN

La capa de mezclado en chorros planos turbulentos se encuentra en diversas aplicaciones de la ingeniería. En particular, ésta domina los patrones de flujo inicial en chorros y estelas. De igual manera, gobierna el campo de flujo en quemadores, mezcladores, en las toberas de los motores a reacción y en las cámaras de combustión, así como en reactores cuyo tamaño o eficiencia depende de la tasa de mezclado. Se le atribuye, además, la mayoría del ruido asociado a la propulsión a chorro producida en la capa de mezclado.

Se presentan en este trabajo los resultados de un estudio experimental sobre el proceso de mezclado en un chorro triple plano en coflujo, en el que existe un cortante entre el chorro central y los chorros laterales. Para cada tasa de velocidades medias – velocidad media del chorro central/velocidad media de chorros laterales– se muestra el desarrollo del perfil de velocidad media y fluctuante desde la salida hasta donde se alcanza la condición de semejanza. También se da la evolución del semiancho del chorro y de la velocidad media central para las diferentes tasas de velocidades medias. En las mediciones se usa un anemómetro de hilo caliente a temperatura constante. El rango del número de Reynolds fue de 0.08 a 0.50. Los perfiles obtenidos no se pueden comparar con resultados experimentales previamente reportados en la literatura especializada en el tema, debido a que no se encontró estudio alguno que fuera semejante, lo que indica que el análisis realizado tiene el mérito de ser un trabajo de investigación, que viene a completar un espacio vacío dentro de la literatura. Finalmente, se dan algunas recomendaciones con relación a posibles trabajos futuros sobre el tema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ABSTRACT

The turbulent mixing layer of plane jets is in diverse applications of the engineering. In particular, this dominates the patterns of initial flow in jets and wakes. In a same way, it governs the field of flow in burners, mixers, in the nozzles of the motors to reaction and combustion chambers, as well as in reactors whose size or efficiency depends on the rate of blended. Likewise, it is attributed most from the noise associated with jet propulsion originated in the mixing layer.

It is presented in this paper the results of an experimental study about the mixing process in a co-flowing triple plane jet with shear layers between central and lateral jets. For every time-mean velocity ratio –central velocity/lateral velocity– the development of the time-mean velocity and the rms profiles is given, from the exit to the point where the similarity condition is attained. The half-wide jet and central velocity developments are also given. A hot wire anemometer is used. The range of the Reynolds-number was of 0.08 to 0.50. The obtained profiles could not be compared with experimental results previously reported in the literature specialized about this subject, because it was not study some that was similar, what indicated that the carried out analysis has the merit of being an investigation work that comes to complete an empty space inside the literature. Finally, some recommendations are given with relationship to possible future works on the subject.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

NOMENCLATURA

A	(-)	coeficiente de calibración.
A	(m)	semiancho del chorro compuesto.
A	(-)	amperímetro.
A ₀	(m)	semiancho del chorro a la salida.
b	(m)	radio de la boquilla.
B	(-)	coeficiente de calibración.
C	(-)	coeficiente de calibración.
D	(-)	coeficiente de calibración.
DC	(A)	corriente eléctrica directa.
e	(V)	error de voltaje, compensador de voltaje.
E	(V)	salida de voltaje del anemómetro conectado a la sonda de un solo hilo.
F	(-)	coeficiente de calibración.
G	(-)	galvanómetro, amplificador de ganancia.
H	(m)	ancho de un conducto.
I	(A)	corriente eléctrica.
m	(Kg/s)	flujo de masa.
P	(Pa)	presión.
P ₀	(Pa)	presión total.
P _{atm}	(Pa)	presión atmosférica.
r	(m)	coordenada radial.
R	(Ω)	resistencia eléctrica.
R _a	(Ω)	resistencia eléctrica del aire.
Re _H	(-)	número de Reynolds, $Re_H \equiv \frac{u H}{\nu}$.
R _L	(Ω)	resistencia eléctrica del inductor.
u' _{rms}	(m/s)	raíz cuadrática media del cuadrado de la fluctuación de la velocidad en la dirección axial.
R _s	(Ω)	resistencia eléctrica en serie.
R _w	(Ω)	resistencia eléctrica del hilo caliente.
t	(s)	tiempo.
T	(-)	tasa de velocidad media, $T \equiv \frac{u_1}{u_2}$.
T	(°C)	temperatura.
T _u	(m/s)	intensidad de turbulencia.
u	(m/s)	velocidad media del fluido.

u'	(m/s)	fluctuación de la velocidad del fluido.
\bar{U}	(m/s)	velocidad media del fluido.
u'^2	(m/s)	raíz cuadrática media del cuadrado de la fluctuación de la velocidad en la dirección axial.
V	(volts)	volts.
v	(m/s)	componente radial.
w	(m/s)	componente tangencial.
x	(m)	coordenada axial, distancia a partir de la salida de la boquilla.
y	(m)	coordenada transversal, posición.
z	(m)	coordenada tangencial.

Símbolos griegos

ρ	(kg/m ³)	densidad.
η	(-)	variable de semejanza.
σ	(-)	constante de la ecuación que predice la distribución de velocidad media de un chorro <i>libre</i> plano turbulento.
ϵ	(%)	exactitud de ajuste de la ecuación de respuesta del hilo caliente.

Superíndices

n	exponente de calibración.
---	---------------------------

Subíndices

0	valor inicial a la salida de la boquilla.
c	valor medio en un punto y, valor calculado.
d	diámetro del sensor de hilo caliente.
E	flujo secundario.
H	valor constante.
I	flujo primario.
m	valor máximo en un punto x.
p	soporte del sensor de hilo caliente.
R	valor de referencia.
w	hilo caliente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PROLOGO

La aerodinámica de chorros *libres* ha atraído la atención de distintos investigadores desde hace muchos años y, al igual que en otras áreas de la ciencia y la tecnología, su interés aumenta rápidamente debido a sus múltiples aplicaciones. En efecto, ejemplos de éstas se dan en procesos de mezclado, así como en cámaras de combustión y chimeneas, entre otras. En general, un chorro *libre* es una porción de fluido a la que inicialmente se le imparte una cierta cantidad de movimiento, la cual se hace descargar en una atmósfera quieta, además de ser tanto una fuente de flujo másico como de cantidad de movimiento.

En particular, es importante resaltar que en cuanto al estudio de tres chorros planos en coflujo se han realizado pocos trabajos, con respecto a los que se han llevado a cabo con dos chorros. Actualmente, entre los pocos trabajos referentes a tres chorros planos en coflujo se encuentran los de Manero (1989) [1], quien desarrolló una técnica para el procesamiento de señales de un velocímetro láser-Doppler, a través de los descubrimientos de Durst y Zaré (1975) [2], con el fin de medir flujos con partículas en suspensión a concentraciones bajas y con distribución de tamaños conocida en tres chorros turbulentos *confinados*.

Asimismo, estos resultados se obtuvieron con el equipo experimental diseñado por Milojevic (1986) [3], mismo que utilizó Mendoza (1996) [4], quien llevó a cabo estudios de transferencia de calor en un chorro triple *confinado* con la presencia de partículas sólidas de arena a bajas concentraciones. Por tanto, aportó resultados experimentales de la velocidad media del fluido, así como de las partículas sólidas. Para ello, utilizó un velocímetro láser-Doppler. Posteriormente, Ávila (1993) [5] presentó un modelo matemático, además de la adaptación de un esquema numérico que permitió simular el comportamiento de tres chorros turbulentos *confinados* con partículas sólidas en suspensión.

Sin embargo, con base en lo anterior y hasta donde se pudo constatar en la literatura especializada en el tema, el proceso de mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo no ha sido estudiado, razón por la cual se tomó como tema de este trabajo.

Por otra parte, la tesis consta de los siguientes cinco capítulos: en el primero se muestra la importancia del estudio de los chorros. Así también, se exponen los objetivos del presente trabajo.

Posteriormente, el capítulo segundo se caracteriza por presentar los conceptos fundamentales de los chorros junto con una clasificación de los mismos. Asimismo, se muestra la nomenclatura utilizada para su descripción, incluyendo algunos perfiles de velocidad media típicos de un chorro *libre* turbulento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Con ello, se acompaña una revisión bibliográfica exhaustiva con el propósito de mostrar un panorama amplio y general en el tema de chorros en conflujo; de tal manera que se citan los artículos experimentales más relacionados con el tema en estudio y, por tanto, ubicar la presente investigación. Por último, con base en la revisión bibliográfica se muestra la justificación del tema de este trabajo.

En tanto, en el tercer capítulo se muestra tanto el arreglo experimental como la metodología utilizada. De esta forma, se hace el planteamiento del problema acompañado de una descripción detallada del equipo diseñado, así como del sistema de medición utilizado, además de destacar en cada uno de ellos las partes más importantes. Adicionalmente, de la misma forma, se habla de la calibración de la sonda de hilo caliente y, complementariamente, se presentan las curvas de calibración empleadas en la experimentación. Finalmente, se muestran las pruebas de aceptación del equipo diseñado.

En general, en el capítulo cuarto figuran los resultados obtenidos, así como la validación del equipo diseñado, la cual incluye la comparación del campo de velocidad media $\bar{u}(x, y)$, obtenido en este estudio, de un solo chorro *libre* plano contra la predicción teórica reportada en la literatura especializada en el tema. En particular, incorpora los resultados experimentales tales como: los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$, así como para un chorro *libre* plano –sólo el central–, el comportamiento que presenta la variación del semiancho del chorro, la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro, ambas como función de la dirección principal del flujo.

Por último, en el quinto capítulo se encuentran tanto las conclusiones generales del trabajo como un sumario de resultados; aunado a algunas recomendaciones con relación a posibles trabajos futuros sobre el tema.

Al respecto, se enlistan las referencias y libros consultados, así como direcciones de Internet; los cuales sirvieron como antecedentes y apoyo para poder realizar y sustentar esta investigación.

Al final, se muestran tres apéndices –dedicados al diseño y construcción del equipo experimental, a la descripción y funcionamiento del anemómetro de hilo caliente y a una memoria de cálculo de los valores del número de Reynolds– que complementan el trabajo.

Juan Carlos Serrano García
Ciudad Universitaria
Agosto de 2003

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia del estudio de los chorros

La capa de mezclado en chorros planos turbulentos se encuentra en diversas aplicaciones de la ingeniería. En particular, esta domina los patrones de flujo inicial en chorros y estelas. De igual manera, gobierna el campo de flujo en quemadores, mezcladores, en las toberas de los motores a reacción, cámaras de combustión, así como en reactores cuyo tamaño o eficiencia depende de la tasa de mezclado, tal y como lo refirió Hill (1976) [6]. Así también, se le atribuye la mayoría del ruido asociado a la propulsión a chorro, tal como lo señalaron Liu, Alper y Mankbudi (1978) [7]; Moore (1978) [8] y Ffowcs y Kempton (1978) [9].

En este sentido, como ejemplos ilustrativos de aplicaciones de la capa de mezclado turbulenta se añaden las siguientes figuras: en la Figura 1.1.1 se muestran dos toberas coaxiales de un turborreactor Boeing Rolls Royce, en donde las lobulaciones se usan para favorecer el mezclado entre los chorros y así reducir la emisión de ruido, descrito en detalle por Ruiz (2000) [10].

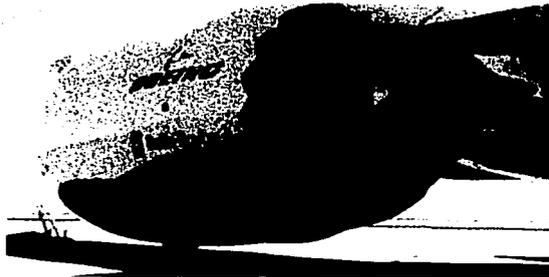


Figura 1.1.1

Dos toberas coaxiales de un turborreactor Boeing Rolls Royce.

Otro ejemplo se tiene en el motor de combustión interna –o endotérmico– alternativo de encendido por chispa, el cual necesita mezclar una cantidad importante de aire–combustible. En general, una gran mayoría de este tipo de motor requiere de un sistema de encendido de la mezcla para iniciar el proceso de combustión. En particular, el encendido se produce por medio de una chispa eléctrica generada en el interior de la cámara de combustión entre los electrodos de una o más bujías, como se esquematiza en las Figuras 1.1.2 y 1.1.3. Asimismo, la mezcla aire–combustible es introducida en la cámara de combustión bajo la forma de mezcla gaseosa a través de los conductos de admisión. Por tal motivo, los conductos deben mantener la mezcla homogénea y estable durante el trayecto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

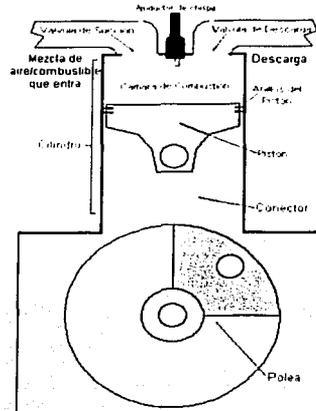


Figura 1.1.2

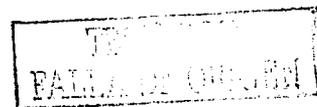
Cámara de combustión, en la cual se quema la mezcla aire–combustible en un motor de combustión interna.

Para ello, el área de la sección de los conductos ha de ser tal que produzca una velocidad de la mezcla tan constante como sea posible y suficiente para mantener su homogeneidad, tal y como lo refirieron Giacosa (1988) [11] y Obert (1995) [12].

Al respecto, los objetivos de la cámara de combustión son: el de quemar rápida y suavemente la mezcla aire–combustible, así como el de obtener una gran turbulencia de la mezcla en la carrera de compresión con objeto de aumentar la rapidez de la combustión y asegurar una mezcla más homogénea para propagar la llama a través de ella. Así, la geometría de los conductos de admisión en combinación con la forma y características térmicas de la cámara de combustión hace fundamental mejorarlos para aumentar la potencia, así como reducir el consumo de combustible y disminuir las emisiones contaminantes, como se explica en Tecno–Racing (2003) [13].

Actualmente, a esta clase de motores pertenecen la mayor parte de los motores de los automóviles, una gran parte de los motores para vehículos industriales, todos los motores de aviación, así como motores para pequeñas plantas de energía y una buena parte para aplicaciones náuticas y agrícolas. Es por ello, que la construcción de motores constituye una de las mayores industrias en el mundo.

Un ejemplo más de la capa de mezclado turbulenta se tiene en los quemadores, en donde también se requiere mezclar aire–combustible para las reacciones de combustión.



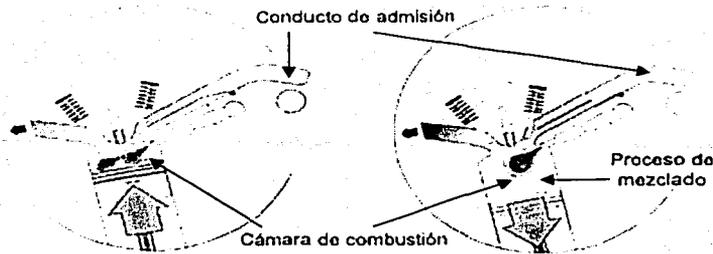


Figura 1.1.3

Los conductos de admisión en combinación con la cámara de combustión juegan un papel fundamental en el aumento de los caballos de fuerza del motor de combustión interna.

En general, una reacción de combustión es aquella que incluye un combustible —en este caso, combustibles que contengan primordialmente carbono e hidrógeno—, así como un oxidante —oxígeno o aire— y liberación de energía, de tal forma que la combustión se realice de manera regular y controlada en toda la salida de los quemadores, mismos que aseguran la aportación adecuada de ambos para conseguir la potencia calorífica requerida, mediante la propagación de la llama y la circulación de los productos de combustión, de tal forma que se transfiera a la carga todo el calor producido, tal y como lo señaló Márquez (1989) [14].

Por otra parte, según sea el combustible utilizado, los quemadores se clasifican en quemadores de combustible sólido, líquido y gaseoso. En particular, en el caso de estos últimos, los quemadores de combustible gaseoso se dividen, a su vez, en varios tipos. A continuación se describen algunos de ellos con el propósito de mostrar la importancia del proceso de mezclado de los flujos o chorros de aire—combustible. Otras clasificaciones, tanto de combustible líquido como de sólido, se tratan en Quemadores (2003) [15].

Quemadores abiertos de tiro natural: se caracterizan por producir una presión negativa en la cámara de combustión que causa el tiro o aspiración del aire necesario, usualmente a través de obturadores ajustables colocados alrededor de las toberas del combustible. Asimismo, la aspiración hacia la cámara puede ser natural, por efecto de chimenea, o inducida por un ventilador de aspiración o extractor, como se muestra en la Figura 1.1.4.

Sin embargo, el mezclado de aire—combustible puede ser deficiente, y quizás no exista control de la tasa aire—combustible. Por tanto, el retroajuste para inyectar aire de combustión precalentado es difícil.

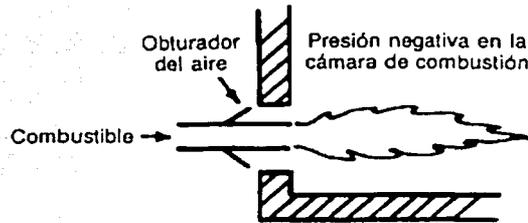


Figura 1.1.4

Quemador abierto de tiro natural.

Quemadores sellados mecánicamente: no tienen entradas tanto de aire libre alrededor de la tobera ni como de aire en forma de persiana en la pared de la cámara de combustión. Así, todo el flujo de entrada de aire generalmente es controlado por un ventilador de inyección o ventilador de tiro forzado que impulsa el aire a través de tubos o de una caja de aire. A su vez, estos quemadores suelen tener una mayor caída de presión de aire en la tobera, de modo que las velocidades del aire son mayores, repercutiendo en un mezclado más homogéneo y en un mejor control de la configuración de la flama. Además, es posible medir el flujo de aire, el cual facilita el control automático de la tasa aire-combustible.

Sistema de quemador con premezclado: puede encontrarse en cualquiera de las dos configuraciones mencionadas anteriormente. Como parte de su diseño, gas y aire se mezclan completamente corriente arriba de la tobera de la flama. De este forma, los pequeños quemadores industriales de paso múltiple que funcionan bajo este sistema facilitan la dispersión de una pequeña cantidad de calor sobre un área extensa. Como ejemplos, están los siguientes: cubas, rodillos, calderas pequeñas, así como placas móviles, como se esquematiza en la Figura 1.1.5.

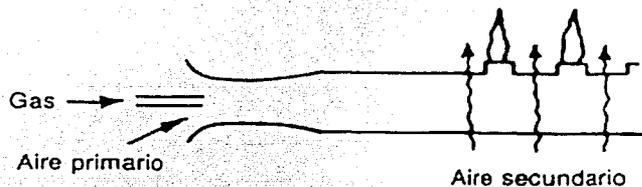


Figura 1.1.5

Quemador de premezclado con inyector.

Asimismo, los grandes quemadores con sistema de premezclado han sido sustituidos por quemadores con mezclado por tobera.

Por otra parte, es posible obtener un mejor control de la tasa aire-combustible con el uso de mezcladores tipo aspirador, en los cuales la inyección de aire aporta la energía necesaria para tener la proporción adecuada de gas, como se presenta en la Figura 1.1.6.

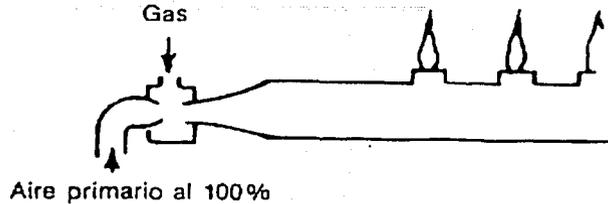


Figura 1.1.6

Quemador de premezclado con aspirador.

Cabe señalar que muchas unidades pequeñas tienen sopladores de tamaño menor al requerido, en virtud de que por aspiración en el horno se obtiene aire secundario. Por tanto, el aumento en los costos de los combustibles hace económicamente impráctico el uso innecesario de exceso de aire en dichas configuraciones.

Sistema de quemador con mezclado en tobera: en este dispositivo se mezclan gas y aire al entrar en la cámara de combustión por la boquilla del quemador, como se ilustra en la Figura 1.1.7. Con este sistema se pueden utilizar diferentes tipos de combustibles, así como obtener una amplia variedad de tasas de aire-combustible y diversos tipos de flama.

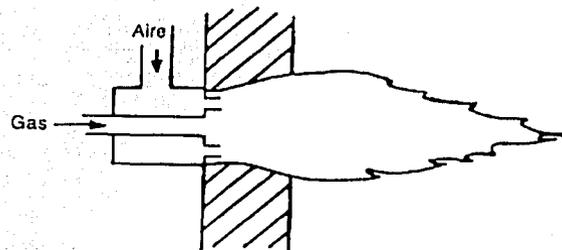


Figura 1.1.7

Quemador con mezclado en tobera controlada por aire.

Además, son útiles para procesos que requieren ambientes especiales, debido a que pueden operar con mezclas muy ricas -50% de exceso de combustible- o muy pobres -1500% de exceso de aire-.

Así también, pueden construirse de manera que las velocidades sean muy grandes, para mejorar aún más la transferencia de calor por convección, como se indica en la Figura 1.1.8. Asimismo, en otros tipos de quemadores se usan efectos centrífugos para hacer que la flama siga el contorno de una pared refractaria adyacente y, de este modo, mejorar la radiación por las paredes, como se esquematiza en la Figura 1.1.9.

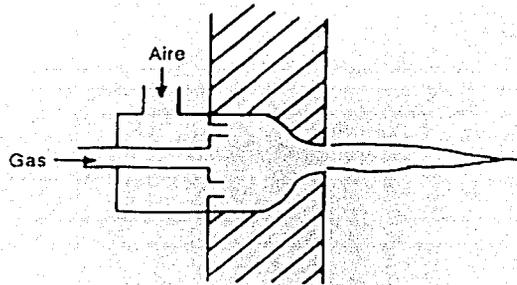


Figura 1.1.8

Quemador de alta velocidad.

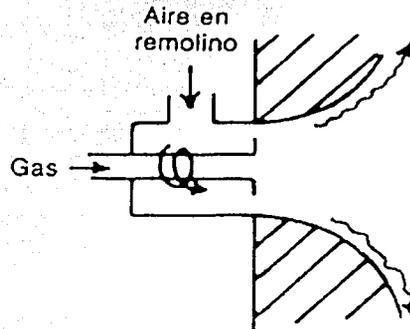


Figura 1.1.9

Quemador de radiación para pared.

Quemadores con mezcla de acción retardada: su forma de mezclado en la tobera es de acción retardada. Por el contrario, un soplete de gas casero presenta una forma natural de mezclado retardado. Por otra parte, la ignición de un combustible en presencia de aire escaso da por resultado la polimerización o pirolisis, de la cual se producen sólidos de apenas algunos micrómetros de diámetro.

TEST CON
FALLA DE ORIGEN

Asimismo, estos sólidos presentes en la flama absorben calor y, por tanto, producen luminiscencia inmediata, haciendo que una llama de mezcla de acción retardada sea amarilla o anaranjada. Con ello, el aumento de la luminosidad mejora la transferencia de calor por radiación de la flama, por lo que es una de las razones de emplear llamas de acción retardada.

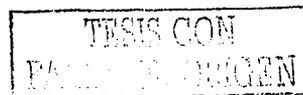
Por último, dentro de estas aplicaciones se muestra otra no menos interesante de los chorros en coflujo, la cual ha sido enfocada a los procesos de micro encapsulación –chorros compuestos–. Por su parte, Kondo en su libro (1979) [16] estableció que la micro encapsulación es un proceso en el cual las concentraciones pequeñas de gases, líquidos, así como de sólidos o ingrediente activos sólidos, son acomodadas dentro de un segundo material con el fin de proteger el ingrediente activo del medio ambiente. En principio, estas cápsulas varían en tamaño desde una micra hasta siete milímetros, liberando su contenido en un tiempo posterior conforme a la aplicación previamente establecida.

Actualmente, la micro encapsulación se ha aplicado extensamente en la industria detergente. En particular, algunos detergentes en polvo contienen enzimas reactivas de las proteínas que, como la proteasa, se usan para remover manchas de sangre. Para ello, las enzimas se encapsulan en un polímero soluble en agua, como el polietilén glicol, utilizado tanto por razones estéticas como de seguridad. Así, las enzimas atacan las proteínas de la sangre, de tal manera que ayudan a eliminar las manchas de sangre, como lo señaló Dziezak en su artículo (1988) [17].

La micro encapsulación es un campo cada vez mayor que está encontrando uso en muchas disciplinas tecnológicas; tanto es así, que una amplia gama de sustancias base han sido encapsuladas, de tal manera que incluyen, entre otras: pegamentos, agroquímicos, catalizadores, células vivas, productos farmacéuticos, así como vitaminas y agua, existiendo muchas ventajas al microencapsular. Se pueden encontrar discusiones excelentes sobre el tema en las investigaciones de Fanger (1974) [18].

En efecto, los líquidos se pueden manejar como sólidos, el olor o el gusto se puede enmascarar con eficacia en un producto alimenticio, las sustancias base se pueden proteger contra los efectos desfavorables del medio ambiente y, además, los materiales tóxicos se pueden manejar con seguridad.

En general, en la mayoría de las microcápsulas, los materiales de recubrimiento son regularmente polímeros orgánicos; sin embargo, las ceras y las grasas también se han utilizado, particularmente en alimentos y drogas. En tanto, en los últimos 45 años se han ampliado continuamente las capacidades de la micro encapsulación. En la Figura 1.1.10 se muestra en forma esquemática el proceso, así como los dispositivos para la micro encapsulación.



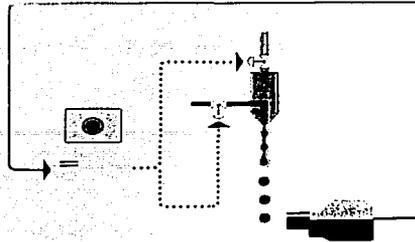


Figura 1.1.10

Proceso y dispositivos para la micro encapsulación.

Cabe mencionar que la tecnología de la micro encapsulación se ha usado para un número considerable de aplicaciones comerciales, tal como ha sido en el proceso de coextrusión, el cual ha sido estudiado detalladamente por Somerville (1960) [19], (1967) [20], (1968) [21]. En esta aplicación, los materiales líquidos de la sustancia base y el material de revestimiento se bombean a través de orificios concéntricos, con el material base fluyendo por el orificio central y el material de revestimiento a través de la pieza anular externa, tal y como se muestra en la Figura 1.1.11.

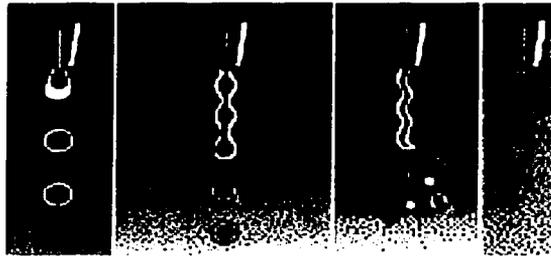


Figura 1.1.11

Proceso de coextrusión para la micro encapsulación.

En síntesis, una gota compuesta formada por una gotita de líquido base cubierta por una capa de líquido de revestimiento define la cápsula. En tanto, el tamaño de las cápsulas producidas, así como la cantidad de material base contenida dentro de cada cápsula, dependen de las propiedades físicas de los fluidos —densidades, viscosidades y tensiones interfaciales—, de las condiciones del proceso —índices de flujo y temperaturas—, de la geometría del inyector —diámetros de los orificios internos y externos— y de la amplitud y frecuencia de las pequeñas perturbaciones vibratorias —naturales o forzadas— presentes en el sistema.

Aunado a esto, el tamaño de la gota compuesta depende de las frecuencias de las vibraciones aplicadas al chorro, como lo refirieron Scheller y Bousfield (1991) [22] en su trabajo. Inicialmente, Scheele y Meister (1968) [23] en su artículo señalaron que si la frecuencia de las perturbaciones aplicadas al chorro se puede controlar, por lo tanto, cada gotita podrá ser producida con un mínimo tamaño. Por tales motivos, la formación de la cápsula de coextrusión es absolutamente complicada.

Por estas y muchas razones más es importante el estudio de los chorros en coflujo, en particular, de la capa de mezclado turbulenta, ya que cada proceso se diseña conforme a las condiciones de funcionamiento que se tengan en forma particular.

1.2 Objetivos del presente trabajo

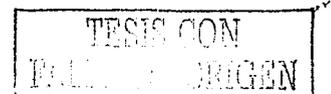
El presente trabajo tiene como objetivo principal realizar un estudio experimental sobre el proceso de mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo, para diferentes tasas de velocidad media, utilizando la técnica de anemometría de hilo caliente –Hot Wire Anemometry, HWA, por sus siglas en inglés–.

Asimismo, la Figura 1.2.1 muestra esquemáticamente el problema en estudio. De esta figura se puede ver que los tres chorros *libres* se generan a la salida de los tres conductos de sección rectangular y se mezclan hasta formar un solo chorro –chorro compuesto– a cierta distancia axial x de la salida, en donde la velocidad media es la misma en los dos chorros laterales \bar{u}_2 . En tanto, el eje x , abscisas, se tiene en la dirección principal del flujo, así como el eje y , ordenadas, en la dirección transversal.

A partir de esto, se obtienen los siguientes perfiles: velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y los de las fluctuaciones de la velocidad $u'(x, y)$ para diferentes tasas de velocidad media T . Para ello, cada tasa de velocidad media se define como: $T \equiv \frac{u_1}{u_2}$. Posteriormente, se estudian las principales características del chorro compuesto, siendo las siguientes: ancho como función de la dirección principal del flujo, x, y , además, el efecto de la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro. De este modo, el mezclado turbulento entre tres chorros permite que T pueda tomar diferentes valores.

Para llevar a cabo el objetivo se plantean las siguientes actividades generales:

1. Revisión bibliográfica.
2. Diseño y construcción del equipo experimental.
3. Pruebas preliminares del equipo diseñado como pruebas de aceptación del mismo.



4. Obtención de las características aerodinámicas del flujo formado por tres chorros *libres* planos en coflujo generados en conductos de sección rectangular.
5. Análisis de resultados finales.



Figura 1.2.1

Esquema que representa las velocidades medias del chorro *libre* plano central, así como las de los dos chorros *libres* planos laterales en coflujo.

Una vez concluida la parte anterior, se establecen los puntos que se desarrollan como objetivos particulares:

1. Obtener experimentalmente los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$ para las siguientes T :

$$1. \quad T = \frac{6 \text{ m}}{6 \text{ s}} = 1.$$

$$2. \quad T = \frac{1 \text{ m}}{4 \text{ s}} = 0.25.$$

$$3. \quad T = \frac{2 \text{ m}}{4 \text{ s}} = 0.5.$$

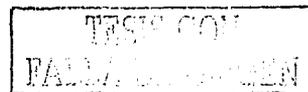
$$4. \quad T = \frac{4 \text{ m}}{2 \text{ s}} = 2.$$

$$5. \quad T = \frac{4 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 4 .$$

, así como para un chorro *libre* plano –sólo el central–. Esto último se realiza con el propósito de validar el buen funcionamiento del equipo construido, así como del sistema de anemometría de hilo caliente.

2. Estudiar el comportamiento que presenta la variación del semiancho del chorro como función de la dirección principal del flujo, x , para las diferentes T .
3. Analizar el efecto de la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro también como función de la dirección principal del flujo, x , para las diferentes T .
4. Comparar el campo de velocidad media $\bar{u}(x, y)$, obtenido experimentalmente, de un solo chorro *libre* plano contra la predicción teórica reportada en el libro de texto de White (1991) [24].

Por otra parte, el anemómetro de hilo caliente se seleccionó como equipo de medición, de acuerdo a las siguientes características generales: alta resolución, alta respuesta a la frecuencia, alta sensibilidad, bajo costo en comparación con el anemómetro láser–Doppler –Laser Doppler Anemometer, LDA, por sus siglas en inglés– y con el sistema de velocimetría por imágenes de partículas –Particles Images Velocimetry, PIV, por sus siglas en inglés–; además, porque es el único que permite medir desde una hasta tres componentes del vector velocidad, colocado en puntos específicos del flujo y, sobre todo, que es el equipo con el que se dispone en el departamento de termoenergía y mejoramiento ambiental –área investigación– de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.



CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

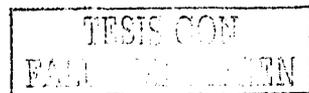
2.1 Conceptos fundamentales

En el presente capítulo se habla de los conceptos fundamentales de chorros y se incluye una clasificación de los tipos de chorros más usados en la industria. Asimismo, con la finalidad de poder comprender la física de chorros, se muestra la nomenclatura que se utiliza para su descripción junto con algunos perfiles de velocidad media típicos que los representan. Además, se incluye una revisión bibliográfica con el objeto de mostrar un panorama amplio y general en el tema de chorros en coflujo, dando cita a los artículos experimentales más relacionados con el tema, con el fin de situar la presente investigación. Finalmente, con base en la revisión bibliográfica, se presenta la justificación del tema del presente trabajo de investigación.

2.1.1 Clasificación

En la literatura existe una variedad de clasificaciones de chorros; sin embargo, el presente autor prefiere dar una breve clasificación de los chorros más usados en la industria y clasificarlos de acuerdo a su condición de generación –*libres* o confinados–, a la dirección que llevan –coflujo o contraflujo– y al tipo de geometría donde se generan –plana, circular, etc.–, auxiliado bajo el marco de las definiciones dadas por Abramovich (1963) [25], Beér y Chigier (1974) [26], así como Hinze (1975) [27] y Mih y Hoopes (1972) [28]:

1. **Chorro libre:** es una porción de fluido que se origina a partir de la salida de una boquilla plana o circular, a la que inicialmente se le imparte una cierta cantidad de movimiento y que se hace descargar en un fluido estacionario de la misma densidad –región inicial–; además, es una fuente de flujo másico y de cantidad de movimiento. Por otra parte, en la región principal, el fluido contenido dentro del chorro disminuye paulatinamente su velocidad media, mientras que el fluido estacionario es gradualmente acelerado y arrastrado –*entrainment*– sin que existan limitaciones en el arrastre. En tanto, una característica que los distingue de los demás tipos de chorros es la distribución Gaussiana que presenta el chorro cuando empieza a desarrollarse –zona de difusión–.
2. **Chorros confinados:** son los chorros que se generan dentro de un conducto plano o circular. Cuando éstos se encuentran confinados existe un abastecimiento limitado de fluido estacionario disponible para el arrastre –caso contrario a los chorros *libres*–, dando como resultado que se forme un gradiente de presión desfavorable a lo largo del chorro asociado con un flujo recirculante fuera del flujo del chorro.
3. **Chorros en coflujo:** es cuando dos o más chorros se mueven en la misma dirección al flujo principal.



4. **Chorros en contraflujo:** reciben este nombre los chorros que se mueven en direcciones contrarias al flujo principal.
5. **Chorros transversales:** se les llama así a los chorros que penetran en dirección perpendicular al flujo principal.
6. **Chorros planos:** son los chorros que se forman por medio de superficies planas, de tal modo que se tienen perfiles de velocidad media dados por: $\bar{u} = \bar{u}(x, y, z, t)$, presupuestos en un sistema de coordenadas cartesianas x, y, z .
7. **Chorros circulares:** este tipo de chorros se forman por el flujo que se genera a través de tubos o boquillas de sección transversal circular. Asimismo, debido a su simetría con el eje, los chorros circulares se pueden considerar como bidimensionales. Esta simplificación es una aproximación muy utilizada en análisis ingenieriles. Así también, se presuponen en un sistema de coordenadas cilíndrico x, r en donde el origen se toma en el plano del orificio y, por tanto, los perfiles de velocidad media se reducen a: $\bar{u} = \bar{u}(x, r, t)$.
8. **Chorros anulares o chorros concéntricos dobles:** son chorros compuestos de sección transversal en forma de ánuos que frecuentemente se utilizan para introducir un flujo secundario alrededor de un flujo primario.
9. **Chorros triples planos:** en esta clase de chorros existe un cortante entre el chorro central, u_1 , y los chorros laterales, u_2 , dando lugar a la posible formación de distintas T. En otras palabras, como ya se mencionó, T se define como: la velocidad media del chorro central entre la velocidad media de los chorros laterales; es decir, $T = \frac{u_1}{u_2}$.

Asimismo, esta T también es válida para dos chorros *libres* planos en coflujo. De este modo, Saiy y Peerless (1978) [29] definieron a T como la velocidad media del flujo secundario, $U_E = u_1$, entre la velocidad media del flujo

primario, $U_1 = u_2$. Con ello, esta $T = \frac{U_E}{U_1} = \frac{u_1}{u_2}$ afectará significativamente tanto las propiedades de la turbulencia

como la tasa de dispersión en la región de mezclado. Aunado a esto, en la Figura 2.1.1 se puede observar que Saiy y Peerless (1978) [29] en sus experimentos implementaron un ángulo de 8.5° entre dos chorros de aire en coflujo. Para ello, utilizaron un sistema de coordenadas cartesianas x, y sobre el cual determinaron el campo de velocidad media y fluctuante, así como los esfuerzos de Reynolds.



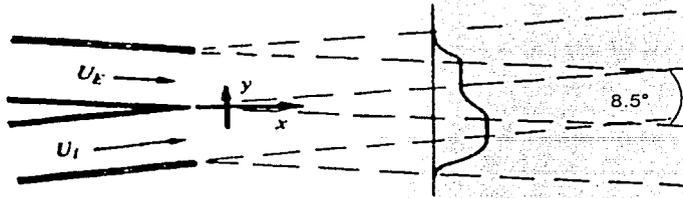


Figura 2.1.1

Diagrama que ilustra la velocidad media del flujo secundario y primario, así como la capa de mezclado.

2.1.2 Nomenclatura

En más de los casos del movimiento de un líquido o gas se generan superficies de separación tangencial al flujo. Así, el flujo en cualquier lado de esta superficie se califica como chorro *libre*. En general, los chorros *libres* se pueden mover en la misma dirección al flujo principal —*coflujo*— o en direcciones opuestas al flujo principal —*contraflujo*—.

Con base en las investigaciones realizadas por Prandtl y Tietjens (1934) [30], se estableció que la inestabilidad de la superficie de separación provoca vórtices sobre ésta, los cuales se mueven de manera desordenada, tanto a lo largo como a través del flujo. Con ello, se provoca un intercambio de materia entre los chorros cercanos; es decir, existe una transferencia de cantidad de movimiento y de calor en la dirección transversal. De esta forma, se obtiene una región de espesor finito con una distribución continua tanto de velocidad como temperatura media formada en el límite entre los dos chorros. Por lo que Abramovich (1963) [31] a esta región la llamó "capa límite del chorro *libre* turbulento".

Si es así, el caso más simple de la capa límite del chorro *libre* se tiene durante la descarga del fluido con un campo de velocidad media inicial uniforme — $\bar{u}_0 = \text{constante}$ — en un medio moviéndose a una velocidad media constante — $\bar{u}_\infty = \text{constante}$ —. A partir de este instante, el espesor de la capa límite en la sección inicial del chorro es igual a cero. Asimismo, el espesor de la capa límite del chorro *libre* está formado de partículas del medio circundante —fluido estacionario— llevadas a lo largo de éste —*entrainment*—, así como de partículas del mismo chorro que han disminuido lentamente su velocidad media, por lo que originan un incremento en la sección transversal del chorro. En tanto, la Figura 2.1.2.1 muestra un diagrama simplificado de un chorro *libre*. Por su parte, White (1991) [24] mencionó que los perfiles de velocidad media observados en la Figura 2.1.2.1 tendrán la misma cantidad de movimiento, pero no el mismo flujo de masa m .

Por ello, el fluido arrastrado corriente abajo hacia el interior del chorro incrementará el flujo de masa; además, White (1991) [24] señaló que la nomenclatura de la Figura 2.1.2.1 sólo es válida cuando el fluido del chorro es igual al fluido del medio circundante. Por ejemplo: aire descargado en aire, no agua en aire.

Adicionalmente, un chorro *libre* está formado por una región inicial, una zona de transición y un área principal. En la región inicial, inmediatamente aguas abajo de la boquilla existe una zona que se le conoce como "núcleo de flujo potencial" donde la velocidad media del fluido permanece sin cambio alguno.

Seguidamente, en esta misma región se presentan vórtices turbulentos formados como resultado de los esfuerzos cortantes producidos por el proceso de mezclado que se tiene en las partes laterales del chorro. Así, el proceso de mezclado se desarrolla tanto en forma interior como exterior con la distancia a partir del origen virtual del chorro.

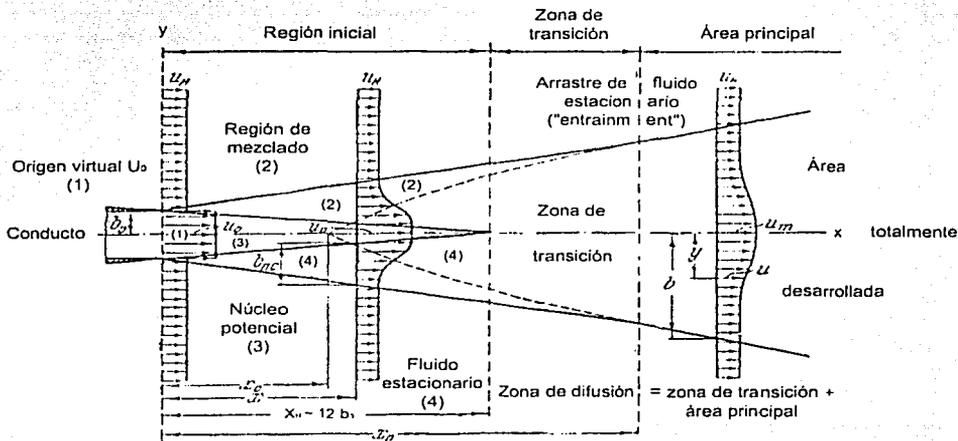


Figura 2.1.2.1

Diagrama simplificado de un chorro *libre* turbulento. –Tomado de Abramovich (1963) [31] y Mih y Hoopes (1972) [28]–

Por otro lado, Beér y Chigier (1974) [32] consideraron que la longitud del núcleo de flujo potencial es de 4 a 5 veces y que la longitud de la región de transición es generalmente de 10 veces el diámetro del conducto corriente abajo, ambas tomadas a partir del origen virtual, respectivamente. Por su parte, Mih y Hoopes (1972) [28] estimaron que la distancia del núcleo de flujo potencial tomada a partir del origen virtual del chorro es de 6 veces el diámetro del conducto corriente abajo. Estos valores también dependen de las condiciones iniciales, tales como la distribución de velocidad media y el nivel de turbulencia que se tenga a la salida del conducto.

Mientras tanto, Van der Hegge Zijnen (1958) [33], Hinze y Van der Hegge Zijnen (1949) [34] y Hinze (1959) [35] supusieron que el inicio de la longitud del área principal tomada a partir del origen virtual es de 8 a 10 veces el diámetro del conducto corriente abajo.

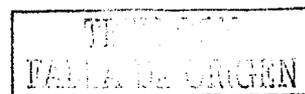
En este contexto, White (1991) [24] consideró que para una longitud de 20 veces el diámetro del conducto corriente abajo, tomado a partir del origen virtual, el perfil de velocidad media ha alcanzado su desarrollo total cumpliendo la condición de semejanza. A su vez, Hinze (1975) [36] utilizó el termino "condición de semejanza" para indicar que la turbulencia mantiene su estructura constante a cualquier número de Reynolds, durante el desarrollo de la región turbulenta en la dirección del flujo principal corriente abajo. Es importante resaltar que la semejanza en los perfiles de velocidad media únicamente se puede observar cuando éstos se normalizan.

En otro orden de ideas, como se ha demostrado en numerosos experimentos, una de las propiedades fundamentales de un chorro *libre* es el hecho de que la presión estática permanezca constante a través del flujo. Sólo en ciertos casos, cuando el chorro interactúa con un obstáculo, la presión puede no permanecer constante, originando que la velocidad media en el núcleo potencial del chorro se mantenga constante.

Complementariamente, White (1991) [24] mencionó que en los chorros *libres* la presión es aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo, excepto para –pequeñas– fluctuaciones turbulentas dentro de la capa de mezclado. Por tal razón, una capa de corte confinada podrá tener un impresionante gradiente de presión.

En general, el tipo de chorro *libre* turbulento más estudiado es el que se expande a través de un medio en reposo, de tal manera que si el campo de velocidad media al inicio del chorro es uniforme, los límites de la capa de mezclado formarán superficies divergentes, las cuales se intersectarán en el borde del conducto. De tal forma, la Figura 2.1.2.3 muestra la zona inicial del chorro.

En particular, en la parte externa del chorro, la capa límite entra en contacto con el fluido estacionario, de modo que el límite externo se utiliza para representar esa superficie en todos los puntos en la que la componente de la velocidad media con respecto al eje x es igual a cero; es decir, $\bar{u}_2 = 0$. Ahora, en la parte interna, la capa límite cambia a un núcleo de velocidad media constante; por tanto, en el límite interno de la capa límite la velocidad media del flujo será igual a la velocidad media de descarga; es decir, $\bar{u}_1 = \bar{u}_0$. Para ello, en esta descripción del chorro se asume que la capa límite es de espesor finito; sin embargo, en ciertas teorías de chorros, se supone que la capa límite es de espesor infinito con perfiles de velocidad y temperatura media asintóticos.



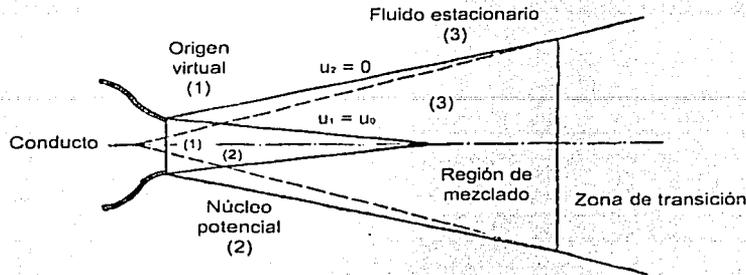


Figura 2.1.2.3

Esquema que ejemplifica la zona inicial de un chorro *libre*. –Tomado de Abramovich (1963) [31] y Mih y Hoopes (1972) [28]–

2.2 Perfiles de velocidad media típicos de un chorro *libre*

Una característica representativa de un chorro *libre* turbulento –como ya diversos investigadores lo han mostrado en la teoría y también mediante numerosos experimentos– es que la velocidad media del flujo transversal al flujo principal es muy pequeña comparada con la velocidad media del flujo longitudinal, la cual incluso puede despreciarse en algunos casos.

Por tanto, si el eje x se alinea con el eje de simetría del flujo, la componente de la velocidad media a lo largo del eje y resulta ser pequeña, de tal manera que ésta se pueda eliminar en análisis ingenieriles que involucren la teoría de chorros *libres*.

En principio, en la Figura 2.2.1, Abramovich (1963) [31] mostró la distribución de velocidad media obtenida de los valores experimentales de Trüpel (1915) [37], a lo largo del eje x a diferentes distancias a partir de la salida de un conducto circular de un chorro *libre* de aire que descarga en aire estacionario. Al respecto, la velocidad media inicial del chorro fue de $\bar{u}_0 = 87 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y el radio de salida del conducto fue de $r_0 = 0.45 \text{ m}$.

A continuación Abramovich (1963) [31] mostró que con los valores experimentales de Trüpel (1915) [37] se obtenía un ensanchamiento continuo del perfil de velocidad media del chorro, mientras que la velocidad media disminuye en el centro y, en consecuencia, el chorro se hace más ancho a medida que se incrementa la distancia a partir del origen virtual del mismo.

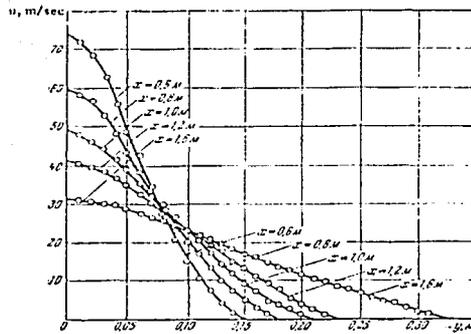


Figura 2.2.1

Perfiles de velocidad media obtenidos a diferentes distancias de un chorro *libre* axialmente simétrico. –Tomado de Abramovich (1963) [31]–

En efecto, los valores de los perfiles de velocidad media obtenidos en la Figura 2.2.1 se normalizan dividiendo la velocidad media entre la velocidad media máxima a lo largo del eje x ; es decir, $\frac{u}{u_m}$, así como dividiendo la posición transversal entre el semiancho del chorro compuesto; es decir, $\frac{y}{y_c}$, para el eje de la ordenada y abscisa, respectivamente. De este modo, en la Figura 2.2.2 se muestra la semejanza de los perfiles de velocidad media para todas las posiciones $\frac{y}{y_c}$ correspondientes al chorro *libre* circular.

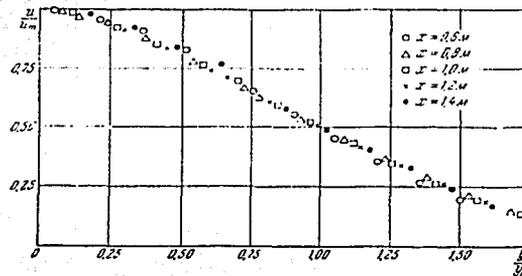


Figura 2.2.2

Perfiles de la velocidad media normalizados a diferentes distancias de un chorro *libre* axialmente simétrico. – Tomado de Abramovich (1963) [31]–

Finalmente, la condición de semejanza que presentan los chorros *libres* circulares también es válida para los chorros *libres* planos que descargan en un fluido estacionario.

De igual manera, Abramovich (1963) [31] mostró que los resultados experimentales de Förthmann (1934) [38] –perfiles de velocidad media de un chorro *libre* de aire plano–, tenían el mismo comportamiento que los de Trüpel (1915) [37]. En síntesis, en las Figuras 2.2.3 y 2.2.4 se pueden ver las distribuciones de velocidad media de Förthmann (1934) [38]. En particular, el chorro provenía de un conducto rectangular de 0.03 m de alto por 0.65 m de ancho, con una velocidad media de descarga de $35 \frac{m}{s}$.

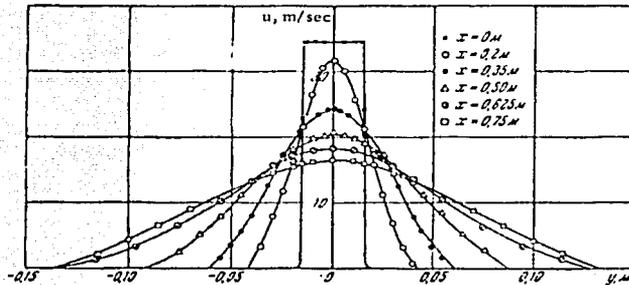


Figura 2.2.3

Perfiles de velocidad media obtenidos a diferentes distancias de un chorro *libre* plano. –Tomado de Abramovich (1963) [31]–

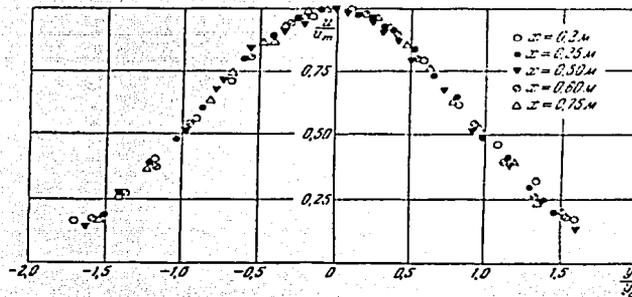


Figura 2.2.4

Perfiles de velocidad media normalizados a diferentes distancias de un chorro *libre* plano. –Tomado de Abramovich (1963) [31]–

2.3 Antecedentes bibliográficos

Por su parte, Townsend (1976) [39] mencionó que los flujos turbulentos por sí mismos presentan un problema de matemática compleja, en la que su solución debe apoyarse fuertemente en valores experimentales. Por ello, es imprescindible tener una medida o un parámetro de referencia de la información que brinda la abundante literatura especializada en el tema, la cual ha sido presentada en diversos medios de difusión tales como: teorías, trabajos experimentales --algunos citados anteriormente-- y modelos computacionales que han permitido obtener la caracterización del comportamiento de este tipo de flujos.

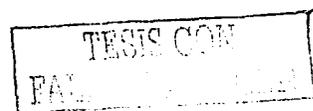
Asimismo, con base en la clasificación dada por Townsend (1976) [39], los flujos turbulentos que se mencionan a continuación se especifican como flujos en dos dimensiones o flujos planos.

En general, en la mecánica de fluidos, y de acuerdo con la literatura especializada en el tema, así como el análisis realizado en el presente estudio, se observó que los flujos más analizados se asocian a los chorros planos y estelas en coflujo, capa de mezclado entre dos chorros planos turbulentos, chorro plano turbulento con calentamiento, capa de mezclado con reacción química turbulenta, capa de mezclado entre dos chorros planos con excitación acústica, chorros axisimétricos en coflujo y, por último, chorros en coflujo giratorios.

A continuación se presenta el aporte de distintos investigadores al esclarecimiento de flujos planos turbulentos.

En principio, Saiy y Peerles (1978) [29] mencionaron que una gran parte de los trabajos experimentales que se han realizado sobre chorros planos bidimensionales han estudiado la estructura de los flujos cortantes turbulentos. Algunos ejemplos de este tipo de trabajos citados por los investigadores son: Liepmann y Laufer (1947) [40], Sunyach y Mathieu (1969) [41], Patel (1970) [42], Bradbury (1965) [43] y Wygnanski y Fiedler (1970) [44], por mencionar sólo algunos, y una menor parte ha trabajado sobre la configuración de la capa de mezclado entre dos flujos turbulentos, entre ellos destacan los siguientes: Peerless (1971) [45], Spencer (1970) [46] y Miller (1968) [47], entre otros.

Sin embargo, sólo los siguientes investigadores han estudiado las características turbulentas de tres chorros planos en coflujo: Manero (1989) [1], Durst y Zaré (1975) [2], Milojevic (1986) [3], Mendoza (1996) [4] y Ávila (1993) [5], como se mencionó anteriormente.



La primera investigación que se hizo sobre la capa de mezclado turbulenta estudiaba un solo chorro descargando en un fluido en reposo. De este modo, Saiy y Peerles (1978) [29] señalaron que esta investigación fue hecha por Liepmann y Laufer (1947) [40], quienes demostraron que el chorro alcanza la condición de semejanza a medida que se incrementa la distancia corriente abajo a partir de la salida del conducto.

Por tanto, dentro de la amplia literatura que existe sobre el crecimiento y desarrollo que posee la capa de corte turbulenta, Oster y Wygnanski (1982) [48] realizaron un resumen de los artículos más importantes que a continuación se citan de manera breve:

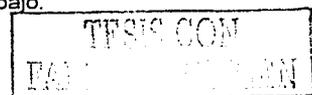
Inicialmente, Wygnanski y Fiedler (1970) [44] realizaron estudios de la capa de mezclado entre dos chorros planos paralelos, con el objeto de identificar los cambios en el chorro producidos por una perturbación periódica de frecuencia controlada originada corriente arriba del chorro. Así, para producir la perturbación artificial en el chorro utilizaron un hilo sujeto a una aleta y concluyeron que éste era el responsable de modificar el crecimiento de la capa de mezclado turbulenta.

Asimismo, Batt (1975) [49] demostró que el hilo sujetado a la aleta aumentó la tasa de crecimiento de la capa de mezclado. Ante estas observaciones, se pudo notar que la capa de mezclado turbulenta es sensible a los efectos de las perturbaciones y, por tanto, de ser modificada por una variedad de condiciones experimentales, es así que se ha convertido en objeto de fuertes discusiones en la literatura. Entre éstas se incluyen las de: Brown y Roshko (1974) [50], Champgne, Pao y Wygnanski (1976) [51], Dimotakis y Brown (1976) [52], Foss (1977) [53], Birch (1977) [54], Oster, Wygnanski, Dziomba y Fiedler (1978) [55], Hussain y Zedan (1978a) [56]–(1978b) [57] y Browand y Latigo (1979) [58], así como otras.

Los primeros investigadores en reportar la existencia de grandes vórtices coherentes en una capa plana de mezclado turbulenta fueron Brown y Roshko (1971) [59], quienes basaron sus resultados en el empleo de una técnica de visualización de flujo.

De acuerdo con sus investigaciones precedentes, Brown y Roshko (1974) [50] mostraron que a través del análisis de una película fue posible observar una reducción en la frecuencia de los vórtices corriente abajo, como resultado del amalgamamiento –unión– entre vórtices adyacentes.

Por su parte, Winant y Browand (1974) [60] observaron que los vórtices adyacentes tienden a girar alrededor de sí mismos antes de amalgamarse y de generar vórtices de mayor escala, proceso que los investigadores denominaron "amalgamamiento de vórtices". Por ello, a medida que el amalgamamiento aumenta, la capa de mezclado se desarrollará con mayor rapidez. En tanto, este proceso ocurre aleatoriamente en espacio y tiempo, ocasionando un crecimiento lineal de la capa de cortante a distancias aguas abajo.



Al respecto, Hernán y Jiménez (1979) [61] analizaron la película estudiada por Brown y Roshko (1974) [50], por medio de una técnica de digitalización de imágenes. Asimismo, sus resultados indicaron que la mayor parte del desarrollo de la capa de mezclado da lugar a grandes vórtices coherentes en lugar del proceso de amalgamamiento, tal como lo refirieron los resultados de Oster, Wygnanski, Dziomba y Fiedler (1978) [55].

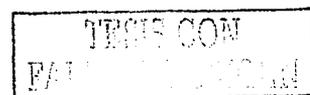
Mientras tanto, Chandrsuda, Mehta, Weir y Bradshaw (1978) [62] encontraron que estos vórtices son residuos de la transición y sólo pueden verse cada vez que el nivel de turbulencia del flujo sea muy bajo.

A través de su estudio Pui y Gartshore (1979) [63] descubrieron que las grandes estructuras coherentes se derivan a partir de mecanismos perturbadores; en particular, una aleta oscilante era la responsable de generar vórtices de gran escala, los cuales desaparecían tan pronto cesaba la oscilación. En este sentido, Friedler y Thies (1978) [64] señalaron que la hipersensibilidad de la capa de mezclado a diferentes mecanismos perturbadores y, por ende, a diversas condiciones experimentales, puede entenderse con mayor facilidad si se acepta la existencia de estructuras coherentes en el flujo.

Así, pequeñas perturbaciones en la dirección normal al chorro pueden desplazar un vórtice, ocasionando que éste gire alrededor de los vórtices vecinos y finalmente se amalgame con éstos. En tanto, estas perturbaciones se pueden dar en cualquier parte del chorro. Ejemplos de éstas son: las aspas de un ventilador, una aleta movida por un motor eléctrico de velocidad variable, como se mencionó anteriormente, y altos niveles de turbulencia, entre otros.

Además, Dimotakis y Brown (1976) [52] junto con Ho y Nosseir (1981) [65] señalaron que los efectos de estas perturbaciones se deben a mecanismos de regeneración, resultado de las interacciones y rápidos desprendimientos de vórtices. Por lo que el flujo parece ser más sensible a las perturbaciones aplicadas al inicio del mezclado, es decir, en la vecindad de la aleta. De esta forma, los vórtices que se desprenden del hilo causan perturbaciones que provocan la inestabilidad natural de la capa de mezclado y, por tanto, cambian su tasa de crecimiento. Por último, Browand y Latigo (1979) [58] y Hussain y Zedan (1978a) [56] – (1978b) [57] refirieron que la turbulencia generada en la capa límite corriente arriba tiene un efecto semejante en la tasa de dispersión de la capa de cortante.

En otro orden de ideas, Flora y Goldschmidt (1969) [66] realizaron estudios con un chorro de aire plano turbulento con el objeto de investigar los efectos producidos por dos orígenes virtuales diferentes, los cuales fueron definidos como geométrico y cinemático, respectivamente. De este modo, uno se basaba en el ensanchamiento del chorro y el otro en la disminución de la velocidad media axial. En tanto, todas las mediciones se realizaron con un tubo de Pitot.



Con ello, determinaron tanto la tasa de ensanchamiento del chorro como la de descenso de la disminución de velocidad media para diversos tipos de boquillas. Adicionalmente, obtuvieron la intensidad de turbulencia para tres diferentes configuraciones.

Posteriormente, Goldschmidt y Bradshaw (1973) [67] mostraron que a través del cálculo de correlaciones de fluctuaciones de velocidad se obtuvieron resultados sobre los efectos de una oscilación producida en un chorro plano. Para ello, emplearon un anemómetro de hilo caliente. Finalmente, determinaron el número de Strouhal, así como la amplitud de la oscilación.

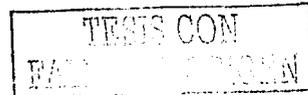
En su momento, Perry y Lim (1978) [68] llevaron a cabo experimentos con chorros coaxiales en coflujo. Así, los investigadores enfocaron su trabajo a visualizar estructuras coherentes y simétricas, aplicando pequeñas oscilaciones a un tubo de vidrio desde el cual se emitía humo.

Dentro de los estudios de la capa de mezclado entre dos chorros planos paralelos se encontraron los realizados por Saiy y Peerless (1978) [29], quienes utilizaron la técnica de HWA. Asimismo, determinaron los campos de velocidad media y fluctuante, así como los esfuerzos de Reynolds. Por ello, la capa de mezclado se generó en un túnel de humo entre dos chorros de aire paralelos en coflujo. En su artículo, los investigadores, presentaron una comparación en la medición de velocidades medias, haciendo uso de la técnica de HWA y mediante un tubo de Pitot.

Por otra parte, siguiendo con el mismo tipo de flujo, Pui y Gartshore (1979) [69] obtuvieron resultados experimentales de la capa de mezclado entre dos chorros planos paralelos. El trabajo se enfocó a medir los campos de velocidad media, intensidad de turbulencia y esfuerzos de Reynolds, así como las estructuras coherentes. Para ello, se utilizó un anemómetro de hilo caliente. Asimismo, se hicieron mediciones a bajas velocidades en un túnel de viento para cinco diferentes tasas de velocidad media.

En investigaciones realizadas por Perry, Lim y Chong (1980) [70] sobre chorros planos en coflujo se emplearon las técnicas de HWA y de visualización. Con base en estas técnicas, se determinaron los perfiles de velocidad media y las estructuras coherentes. Además, en el estudio se empleó la teoría del punto crítico, con el objeto de tener una descripción cualitativa del flujo tridimensional.

Rajagopalan y Antonia (1981) [71] usaron un anemómetro de hilo caliente para analizar chorros planos ligeramente calentados. Por tanto, su contribución radicó en mostrar resultados de la velocidad de convección en una capa de mezclado turbulenta. Para lograr lo anterior, en el experimento se montó un arreglo de hilos fríos que medían simultáneamente las fluctuaciones de temperatura y velocidad, en diferentes puntos.



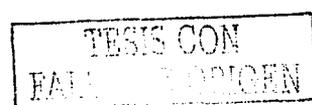
Junto con Jiménez, Hernán (1982) [72] realizó estudios de la capa de mezclado en chorros planos turbulentos usando una técnica de digitalización. Al respecto, los investigadores mostraron una secuencia de 373 imágenes, todas ellas fueron digitalizadas y analizadas, por lo que fue posible aislar y medir la concentración de los remolinos que constituyen su estructura. Así, los investigadores siguieron su evolución individual en el tiempo, en tanto los resultados indicaron que la mayor parte del arrastre ocurre durante el desarrollo normal de los remolinos y no cuando se amalgaman.

En el trabajo efectuado por Oster y Wygnanski (1982) [48] referente a la capa de mezclado entre dos chorros planos paralelos, se estudiaron los efectos de una excitación periódica bidimensional en una región de mezclado turbulenta totalmente desarrollada, a través de la técnica de HWA. Para ello, se aplicaron oscilaciones sinusoidales producidas mediante un generador de funciones; éstas fueron monitoreadas usando una luz estroboscópica.

Uno de los primeros estudios analíticos sobre la capa de mezclado en chorros planos se debió a Lin y Corcos (1984) [73], quienes mediante solución numérica —diferencias finitas— ilustraron la evolución no lineal de la vorticidad en una deformación plana. De este modo, se resolvió el problema de valores propios para perturbaciones infinitesimales, así como las funciones propias como condiciones iniciales para la solución numérica.

Por su parte, Perry y Tan (1984) [74] analizaron chorros planos y estelas en coflujo recurriendo a las técnicas de visualización y anemometría de hilo caliente—volador—Hot Wire Anemometry—Flying, HWA—F, por sus siglas en inglés—. En este sentido, el trabajo consistió en determinar el campo de velocidad media de los vórtices tridimensionales en chorros y estelas. Igualmente, examinaron las clasificaciones de las estructuras y topologías obtenidas por Perry y Lim (1978) [68], así como las interpretaciones de Perry, Lim y Chong (1980) [70], llegando a conclusiones distintas, por lo que sugirieron que algunos de estos resultados requerían modificaciones.

De entre los estudios de la capa de mezclado entre dos chorros planos paralelos, se localizó el efectuado por Jiménez, Cogollos y Bernal (1985) [75] en el que emplearon las técnicas de digitalización de imágenes y fluorescencia inducida por láser plana —Plane Laser Induced Fluorescence, PLIF, por sus siglas en inglés—. A partir de estas técnicas, obtuvieron una perspectiva tridimensional de la capa de mezclado, presentando tres secuencias de películas: dos a bajos y una más para altos números de Reynolds, respectivamente. En tanto, cada secuencia estaba formada aproximadamente por 200 imágenes consecutivas, de las cuales todas ellas fueron digitalizadas.



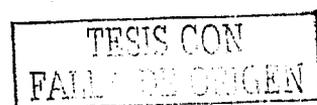
Los experimentos realizados por Hussain y Zaman (1985) [76] aportaron nueva información sobre los estudios de la capa de mezclado que se origina de una capa límite turbulenta totalmente desarrollada a través de la técnica de HWA. Por tanto, los resultados obtenidos mostraron los perfiles de velocidad media, intensidad de turbulencia, así como los esfuerzos de Reynolds. Del mismo modo, los investigadores reportaron esquemas de estructuras coherentes en tres orientaciones y regiones diferentes.

Como parte de las investigaciones realizadas de la capa de mezclado entre dos chorros de helio-nitrógeno planos turbulentos, se encontró la de Bernal y Roshko (1986) [77], quienes utilizaron las técnicas de verificación óptica de perfiles –Shadowgraph–, Schlieren y PLIF, así como un tubo de Pitot de cinco orificios. Con estas técnicas estudiaron la estructura y evolución de los vórtices en la capa de mezclado. De igual manera, presentaron la evolución y variación de los perfiles de concentración media, así como los de la raíz cuadrática media de la fluctuación de la velocidad –RMS– para posiciones distintas.

Entre los trabajos realizados por Masutani y Bowman (1986) [78] se encontró el de la capa de mezclado en chorros planos turbulentos. En ella, se introdujo una nueva variante a este tipo de flujo. En particular, esta variante consistió en llevar a cabo una reacción química en la capa de mezclado, con el objeto de medir la concentración de reactivos y reactantes en la capa de mezclado. Para ello, se emplearon las técnicas de espectroscopia de absorción, PLIF y la de HWA, con lo que fue posible examinar las estructuras de la mezcla reactiva y no reactiva. Con base en los resultados obtenidos se establecieron las características hidrodinámicas, el arrastre y las propiedades de mezclado de los chorros en el régimen previo al inicio de la transición.

A través de su estudio Agüí y Hesselink (1988) [79] desarrollaron un trabajo tanto experimental como teórico dentro de los chorros planos en coflujo. En él usaron las siguientes tres técnicas: una de visualización con humo, otra de digitalización de imágenes y una más de simulación numérica, con el objeto de determinar la estructura de los chorros en coflujo. La primera consistió en obtener vistas tridimensionales del chorro turbulento, en tanto la segunda permitió tener una descripción bastante exacta del chorro, mientras que la última buscó simular numéricamente el chorro.

Por otro lado, Wygnanski y Weisbrot (1988) [80] mostraron los resultados de los experimentos de la capa de mezclado en chorros planos excitada a través de una perturbación externa. En particular, estudiaron la evolución de las velocidades medias e intensidades de turbulencia, así como el efecto de las perturbaciones en la capa de mezclado turbulenta. Para ello, la perturbación artificial se generó por medio de una aleta, movida por un motor eléctrico de velocidad variable. Asimismo, en el análisis del chorro se empleó una técnica de visualización. Complementariamente, realizaron el siguiente experimento: perturbaron el chorro a frecuencias distintas y variaron la amplitud del movimiento de la aleta.



Similarmente, Huang y Ho (1990) [81] realizaron estudios de la capa de mezclado entre dos chorros planos laminares excitada por medio de una perturbación acústica. Los investigadores obtuvieron la distribución de velocidades medias, así como las estructuras de los vórtices en la etapa de transición con la técnica de HWA. Conforme a los resultados obtenidos concluyeron que en la capa de mezclado laminar, el amalgamamiento de vórtices es el mejor mecanismo que favorece la transferencia de masa y cantidad de movimiento a través del chorro.

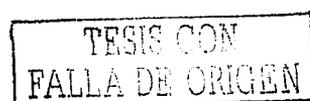
En este contexto, Nygaard y Glezer (1991) [82] efectuaron investigaciones orientadas a medir la capa de mezclado en chorros planos paralelos. En particular, utilizaron las técnicas de visualización y HWA, así como un tubo de Pitot. De esta manera, pudieron determinar los perfiles de velocidad media y las fluctuaciones de velocidad; además, la estructura y evolución de los vórtices. Cabe resaltar que el trabajo fue enfocado a la evolución de las estructuras vorticosas, a la formación de los vórtices y sus espaciamientos.

Otro de los estudios de chorros planos en coflujo fue el efectuado por Mehta (1991) [83], quien obtuvo resultados de los efectos de cinco diferentes tasas de velocidad media en el desarrollo de una capa de mezclado turbulenta. En tanto, para cada tasa de velocidad media midió el campo de velocidad media e intensidad de turbulencia. Asimismo, estudió el efecto de la estela que forma la placa que separa los chorros. De igual forma, determinó los esfuerzos cortantes máximos y la evolución de la velocidad media máxima para las cinco tasas de velocidad media, así como el efecto de la estela. Para ello, empleó la técnica de HWA.

Complementariamente, Bell y Mehta (1992) [84] realizaron aportaciones sobre chorros planos en coflujo auxiliándose de la técnica de HWA. Con este equipo, los investigadores obtuvieron tanto los campos de vorticidad media como los de velocidad media; además, de los esfuerzos normales y cortantes turbulentos. La idea de medir las estructuras vorticosas en la capa de mezclado fue darle seguimiento al trabajo tratado inicialmente por Mehta (1991) [83].

Adicionalmente, Bell y Mehta (1993) [85] dieron seguimiento a sus aportaciones publicadas en 1992 [82] con el objeto de estudiar los efectos de cuatro tipos de perturbaciones impuestas a estructuras de una capa de mezclado, mediante la técnica de HWA. El análisis de las mediciones efectuadas permitió obtener tanto los perfiles de velocidad media como los de vorticidad, así como los esfuerzos cortantes turbulentos, incluyendo el espesor de la capa de mezclado y la energía cinética turbulenta.

Seguidamente, Nygaard y Glezer (1994) [86] con equipo experimental de visualización –Schlieren– y anemometría de hilo caliente, mostraron resultados concernientes al estudio de la capa de mezclado entre dos chorros planos paralelos. A partir de estas técnicas se obtuvieron los efectos de las variaciones de fase en la capa de mezclado.



Ejemplo de ello fue el aporte de distintos esquemas ilustrativos al esclarecimiento de diferentes variaciones de fase. Igualmente, determinaron el campo de velocidad media y la evolución de las estructuras vorticosas en la capa de mezclado.

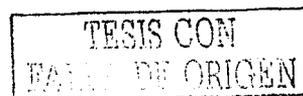
En su estudio tanto de estelas como de chorros axisimétricos en coflujo, Nickels y Perry (1996) [87] realizaron por medio de la técnica de HWA y mediante un tubo de Pitot la caracterización del campo de velocidad media, así como la variación de los esfuerzos de Reynolds para diferentes tasas de velocidad media. Así, los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis comparativo con trabajos recientes reportados por otros investigadores, observándose una buena concordancia con estos trabajos.

Asociado a los experimentos de la capa de mezclado entre dos chorros planos paralelos, Tung y Kleis (1996) [88] determinaron la distribución y crecimiento de las estructuras vorticosas en la capa de mezclado perturbada acústicamente, así como el campo de velocidad media. En particular, las mediciones de velocidad media se realizaron con un anemómetro de hilo caliente y un tubo de Pitot.

Mientras tanto, Naughton, Cattafesta y Settles (1997) [89] estudiaron el comportamiento de chorros en coflujo giratorios mediante las técnicas de dispersión láser plana –Planar Laser Scattering, PLS, por sus siglas en inglés– y la de velocímetro láser–Doppler –Laser Doppler Velocimeter, LDV, por sus siglas en inglés–. La experimentación comprendió el análisis de los efectos de la capa de mezclado turbulenta de chorros con giro para diferentes tasas de giro y compresibilidad obtenidos con la técnica PLS. En tanto, las mediciones de los perfiles de velocidad media se cuantificaron con la técnica LDV.

Recientemente, Everson, Manin y Sirovich (1998) [90] llevaron a cabo dos experimentos con chorros axisimétricos en coflujo a través de la técnica PLS. El objeto fue determinar tanto la tasa de mezclado como la de generación de entropía para ambos experimentos. Asimismo, en el primer experimento se estudió el comportamiento de los chorros axisimétricos, mientras que en el segundo se modeló la configuración de un inyector en la cámara de combustión de una turbina de gas.

Finalmente, en el trabajo desarrollado por Papadopoulos y Pitts (1998) [91] referente a chorros axisimétricos en coflujo, se reportaron las características medias y turbulentas de la distribución de velocidad media corriente arriba, ayudando de esta forma a comprender los efectos del número de Reynolds para flujos totalmente desarrollados. Para ello, los autores emplearon tanto la técnica de PLS como la de HWA.



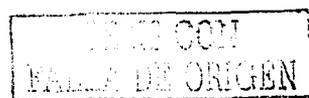
2.4 Justificación del presente trabajo

Con base en el escenario antes descrito –antecedentes bibliográficos– se encontraron únicamente los siguientes trabajos experimentales referentes a tres chorros *confinados* planos en coflujo: Manero (1989) [1], Durst y Zaré (1975) [2], Milojevic (1986) [3], Mendoza (1996) [4], y tan sólo existe un caso numérico referido a Ávila (1993) [5]. Sin embargo, el proceso de mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo no ha sido estudiado, hasta donde se sabe. Por tanto, su estudio requiere de investigación tanto experimental como teórica, así como de una estrecha relación entre ambas actividades.

De esta forma, surge la idea de aportar nuevos conocimientos al proceso de mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo. La importancia de este proceso radica en estudiar experimentalmente el mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo, para diferentes T , utilizando para ello la técnica de HWA y, en particular, midiendo con una sola sonda de hilo caliente.

Asimismo, durante el desarrollo de la investigación se procuró desarrollar, en la medida de lo posible, los siguientes objetivos: obtención de los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$, así como para un chorro *libre* plano –sólo el central–; estudiar el comportamiento que presenta la variación del semiancho del chorro como función de la dirección principal del flujo; analizar el efecto de la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro, también, como función de la dirección principal del flujo y comparar el campo de velocidad media $\bar{u}(x, y)$, obtenido en este trabajo, de un solo chorro *libre* plano contra la predicción teórica previamente reportada en la literatura.

Con esto se espera contribuir al entendimiento de un proceso de mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo, con el objeto de completar el espacio vacío que se tiene dentro de la literatura especializada en el tema. Por tanto, esta fue la motivación principal para la realización del presente estudio.



ARREGLO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA UTILIZADA

Hasta el momento sólo se han considerado algunos aspectos generales de chorros. Por ejemplo: su importancia, sus características turbulentas y sus perfiles de velocidad media, entre otros. De la misma forma, se presentó una revisión bibliográfica exhaustiva con el objeto de mostrar un panorama amplio y general en el tema de chorros en coflujo, citándose los artículos experimentales más relacionados con el tema.

Ahora, en este capítulo, se detallan los aspectos experimentales de la presente investigación. Inicialmente, se presenta el planteamiento del problema, así como una descripción completa del equipo diseñado y del sistema de medición. Asimismo, se habla de la calibración de la sonda de hilo caliente. De igual manera, se muestra la metodología que se usó en forma sistemática para lograr resultados satisfactorios. Finalmente, se describen las pruebas de aceptación del equipo diseñado.

3.1 Planteamiento del problema

En la Figura 3.1.1 se muestra esquemáticamente el proceso de mezclado de los tres chorros *libres* planos en coflujo, objeto de la presente investigación, en donde los chorros *libres* se forman a la salida de los tres conductos de sección rectangular y se mezclan hasta formar un solo chorro—chorro compuesto— a cierta distancia axial x de la salida.

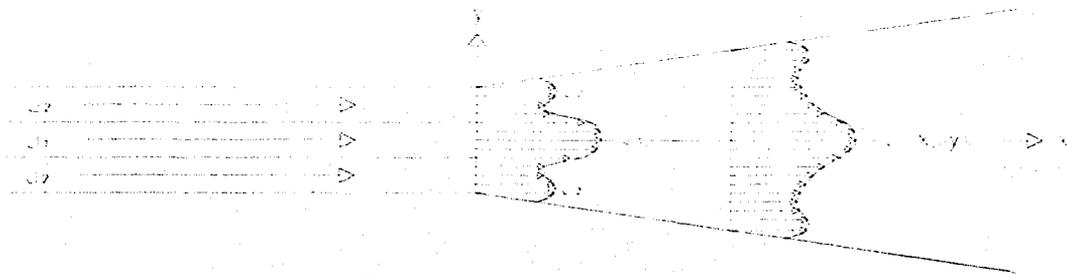


Figura 3.1.1

Proceso de mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo.

De este modo, se obtendrán los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$ para diferentes T , así como para un chorro *libre* plano—sólo el central—.

Posteriormente, se estudiará el comportamiento que presenta la variación del semiancho del chorro como función de la dirección principal del flujo. Asimismo, se analizará el efecto de la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro también como función de la dirección principal del flujo. Finalmente, se comparará el campo de velocidad media $\bar{u}(x, y)$, obtenido en este trabajo, de un solo chorro *libre* plano contra las predicción teórica reportada previamente en la literatura.

3.2 Descripción del equipo diseñado y sistema de medición

Con objeto de estudiar el desarrollo aerodinámico de los chorros *libres* planos paralelos en coflujo se diseñó y construyó el equipo experimental que se muestra esquemáticamente en la Figura 3.2.1a. De aquí, se puede ver que los chorros se generan mediante tres conductos de sección rectangular, los cuales producen un flujo turbulento desarrollado a la salida.

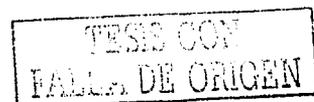
En particular, los conductos fueron hechos de acrílico transparente, los cuales cuentan con las siguientes dimensiones: 1 m de largo por 0.015 m de ancho y 0.15 m de alto. Asimismo, los detalles constructivos se muestran en el Apéndice A.

En tanto, el flujo se genera mediante un turbosoplador y se hace pasar a través de un tanque para amortiguar cualquier oscilación producida por éste. Así, del tanque, el flujo se distribuye a los conductos rectangulares mediante una "Y" doble. Finalmente, el flujo en cada conducto se controla por una válvula tipo mariposa de hierro modular cromado.

Por otra parte, el equipo de medición consta de un anemómetro de hilo caliente funcionando a temperatura constante, marca Dantec Dynamics, que incluye el sistema de adquisición de datos y el sistema de calibración electrónico, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.2.1b. Mientras tanto, el aire que entra a este último sistema se hace pasar previamente por un filtro clase cuatro, $< 50 \mu\text{m}$ con la finalidad de evitar posibles daños al sensor de hilo caliente.

Aunado a esto, el sensor de hilo caliente se coloca paralelamente en la dirección del flujo y se hace sujetar por un brazo mecánico, el cual forma parte de la máquina posicionadora 3D, controlado directamente desde la computadora.

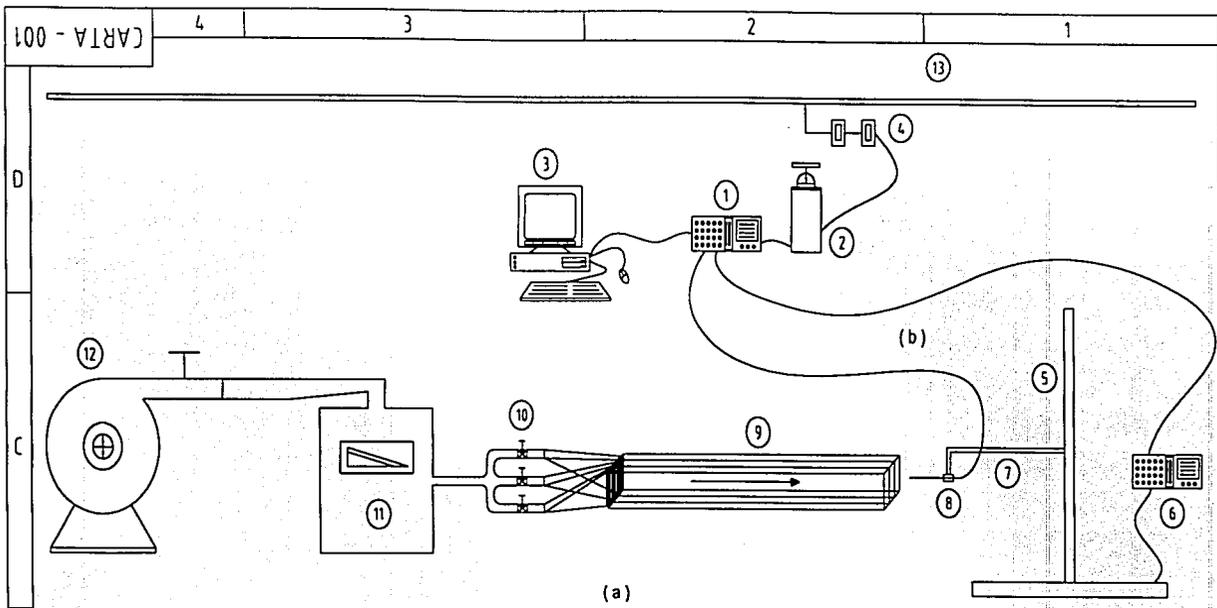
En general, el anemómetro de hilo caliente basa su operación en la pérdida de calor a través de un diminuto sensor, el cual básicamente es una resistencia –hilo– caliente. Aunado a que tiene una alta sensibilidad y una gran velocidad de respuesta para medir las variaciones de velocidad media del fluido.



Es así que la ventaja principal de este tipo de instrumento es su alta capacidad de respuesta, con lo que es posible analizar fluctuaciones de velocidad por arriba de los 50 kHz y, por tanto, obtener una caracterización casi completa de la turbulencia.

Estos aspectos serán estudiados con detalle en la Sección 3.3 —calibración de la sonda de hilo caliente— y en el Apéndice B —descripción y funcionamiento del anemómetro de hilo caliente—. Enseguida se muestran una serie de fotos del equipo diseñado, así como del sistema de medición, acompañadas de una descripción breve de los puntos más significativos.

TESIS CON
FOT. DE ORIGEN



NOTA	DESCRIPCIÓN
①	Módulo principal de anemometría de hilo caliente
②	Sistema de calibración
③	Sistema de adquisición de datos
④	Filtros de aire
⑤	Máquina posicionadora 3D
⑥	Módulo principal de la máquina posicionadora 3D
⑦	Brazo mecánico de la máquina posicionadora 3D

NOTA	DESCRIPCIÓN
⑧	Portasensor y sensor de hilo caliente
⑨	Conductos paralelos de sección rectangular
⑩	Válvulas tipo mariposa
⑪	Tanque amortiguador de pulsos
⑫	Turbosoplador
⑬	Línea de aire comprimido

ACOT.:

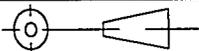
DEPARTAMENTO DE TERMOENERGÍA Y MEJORAMIENTO AMBIENTAL

ING JUAN CARLOS SERRANO GARCÍA

ESCALA: S/E

SISTEMA DE MEDICIÓN Y ESQUEMA DEL EQUIPO

05-03-2002



CARTA - 001

Figura 3.2.1 (a) descripción del modelo experimental y (b) sistema de medición

FALLA DE ORIGEN

32

La Figura 3.2.2 muestra la vista lateral de los tres conductos rectangulares. De modo que, en el extremo de salida de los conductos —que es donde se inician los chorros— se indica el sistema de coordenadas espacial x , y y z que se utiliza para su descripción. De igual manera, se pueden apreciar las tres válvulas tipo mariposa de hierro modular cromado que controlan el flujo inducido por el turbosoplador, así como las bolsas de lona que sirven de conexión entre las válvulas y la entrada del flujo a los conductos.

Por otra parte, en la vista lateral de los conductos se indica la dirección del flujo de aire. Por último, se muestra el módulo de control de la máquina posicionadora 3D, mismo que se conecta al módulo principal del equipo de anemometría de hilo caliente.

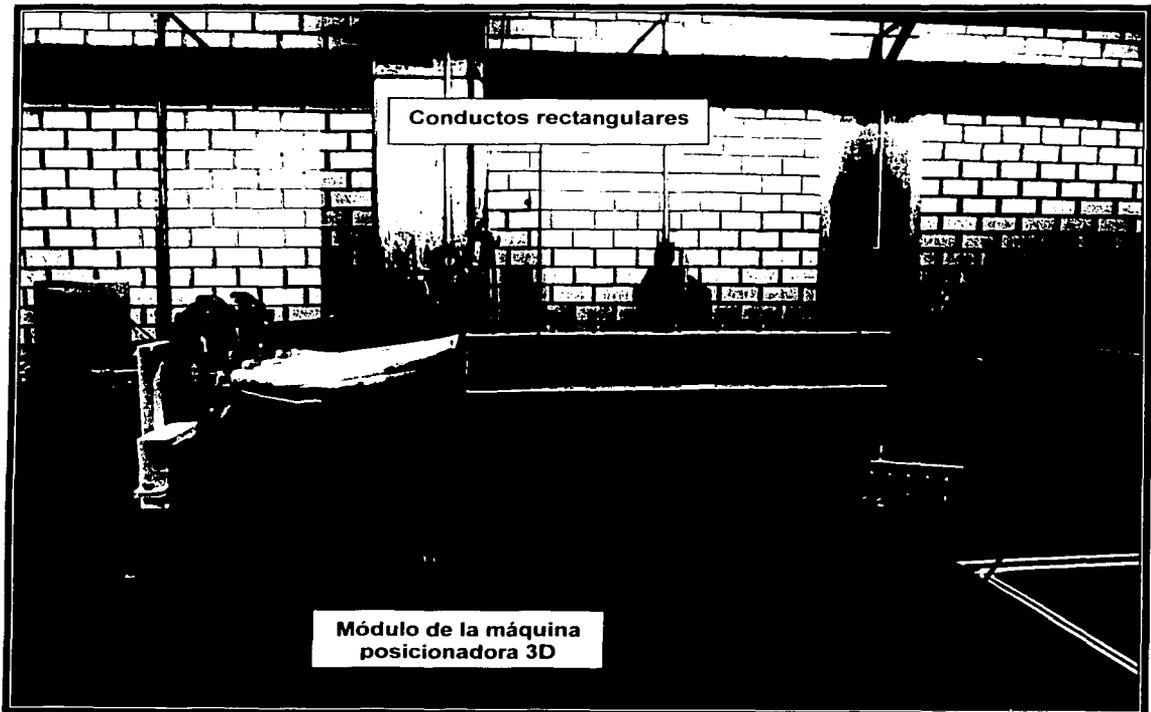
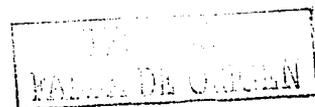


Figura 3.2.2

Vista lateral de los conductos rectangulares.



En la Figura 3.2.3 se puede apreciar una vista frontal de la salida de los conductos, en la cual se indican las zonas de medición tanto de las velocidades medias de los dos chorros laterales \bar{u}_2 , como la del chorro central \bar{u}_1 . Con ellas se generan las diferentes T , las cuales, como ya se mencionó, se definen como: $T \equiv \frac{u_1}{u_2}$. Más adelante, esta vista frontal servirá para explicar de forma detallada las pruebas de aceptación del equipo diseñado, así como del buen funcionamiento del anemómetro de hilo caliente, tal y como se señala en la Sección 3.5, Figura 3.5.1.

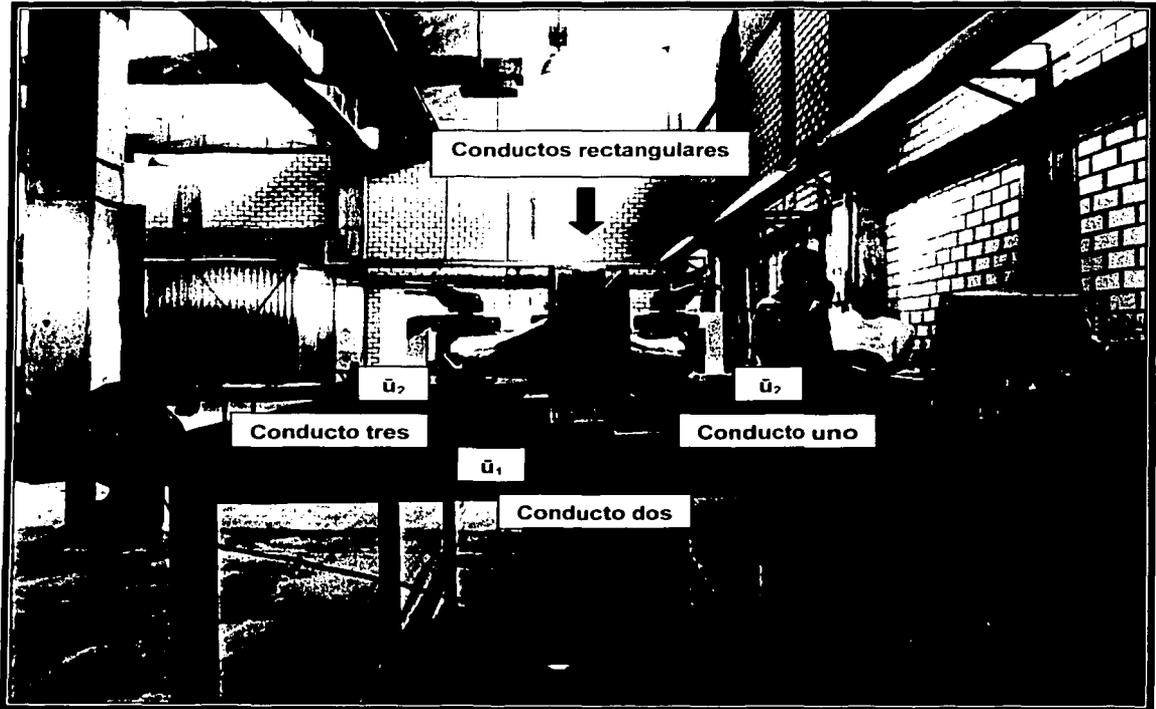


Figura 3.2.3

Vista frontal de los conductos rectangulares.

La Figura 3.2.4 presenta una panorámica tanto del equipo diseñado como del sistema de medición en general. En primer plano se pueden ver el turbosoplador de 15 Kw, el tanque amortiguador de pulsos, seguidos por la tubería –PVC de tres pulgadas de diámetro nominal– de conexión al sistema de distribución de flujo, válvulas y conductos rectangulares.

En segundo plano se muestra el sistema de medición que consta del módulo principal de anemometría de hilo caliente, así como de los siguientes sistemas: calibración y adquisición de datos. Finalmente, en un último plano se ve la máquina posicionadora 3D, la cual por medio de un brazo mecánico, también diseñado y fabricado para este trabajo, sujeta al portasensor de hilo caliente permitiéndole un libre desplazamiento a cualquier punto del flujo x , y , y z de los chorros *libres* de aire.

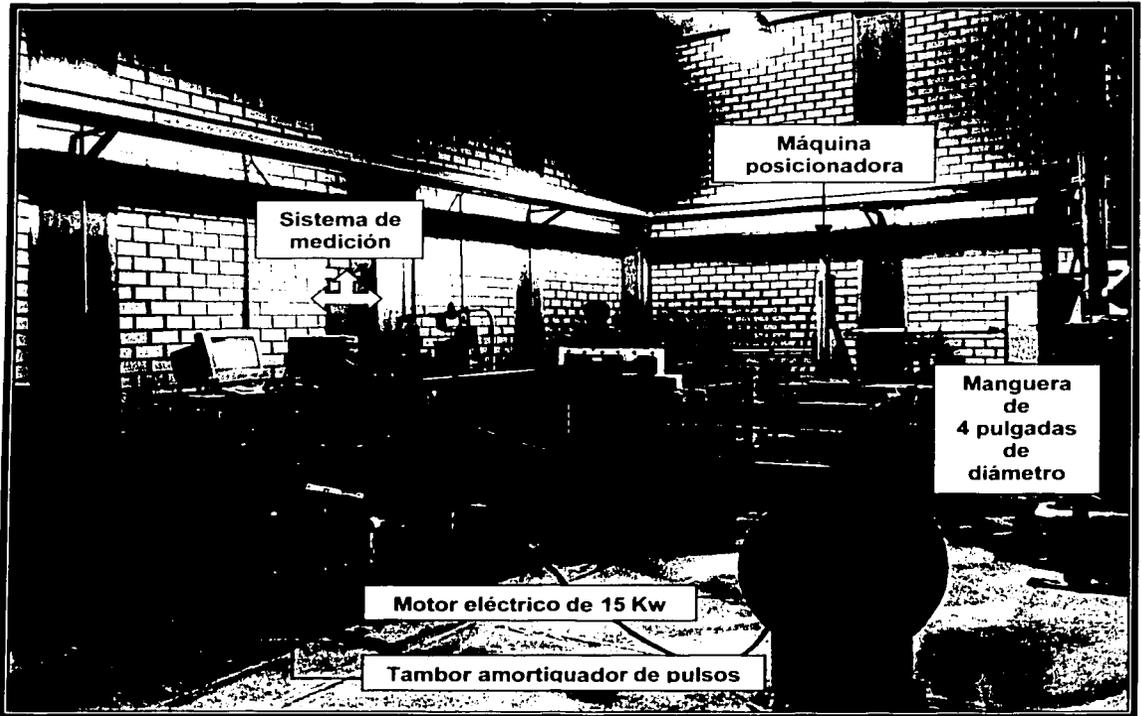


Figura 3.2.4

Vista panorámica tanto del equipo diseñado como del sistema de medición en general.



En la Figura 3.2.5 se tiene el sistema de distribución de flujo, mediante una "Y" doble, mismo que lo trifurca hacia las válvulas de control de flujo tipo mariposa de dos pulgadas de diámetro de hierro modular cromado. En primer plano se muestra la tubería de PVC de 3 pulgadas de diámetro nominal, la cual está formada por cuatro codos de 45° y dos de 90°, tres conectores, dos tramos rectos de 3.5 m de longitud, así como una "Y" doble.

Por último, se aprecia la máquina posicionadora 3D que mueve al hilo caliente a lo largo del flujo de los chorros *libres*. En particular, esta máquina se maneja a través del software "Streamware" instalado en el disco duro de la computadora. A su vez, el "Streamware" permite controlar el desplazamiento espacial x , y y z del sensor de hilo caliente, así como lleva a cabo la calibración automática del sensor.

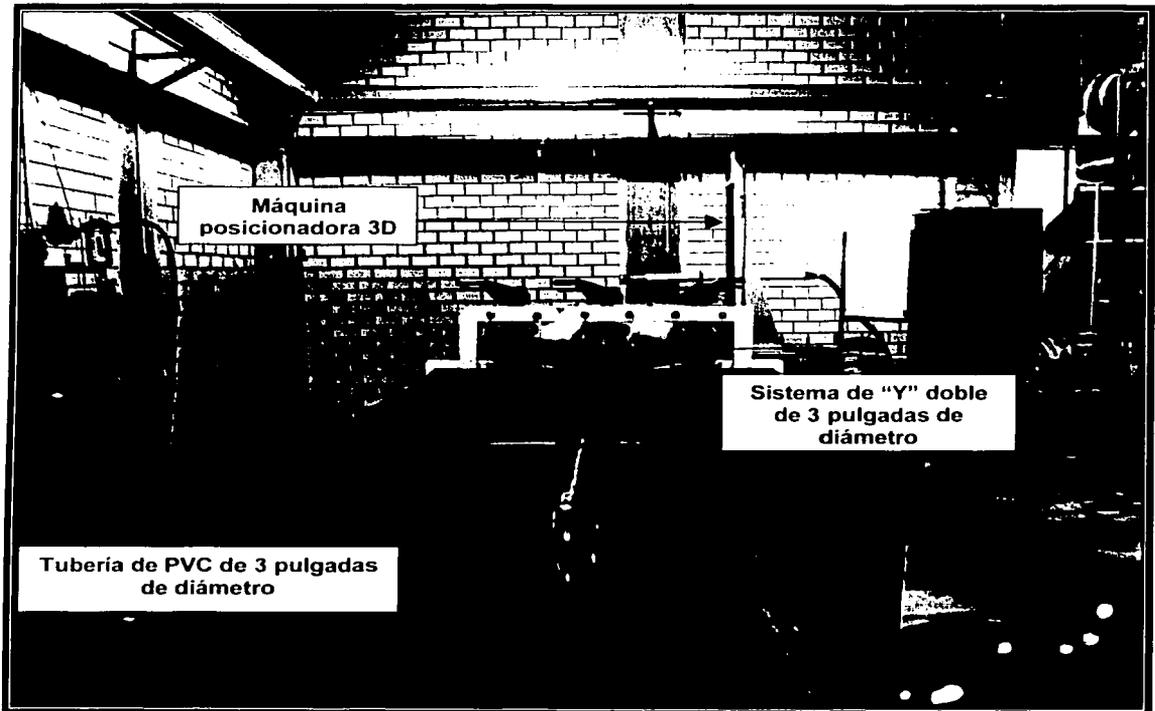


Figura 3.2.5

Vista del sistema de trifurcación de flujo de aire.

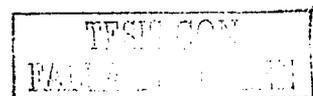
La Figura 3.2.6 identifica el sistema de medición. Como ya se mencionó, este sistema consta del anemómetro de hilo caliente, modelo "Streamline" de la empresa Dantec Dynamics, –módulo principal– y éste, a su vez, está integrado por un módulo de calibración, así como de una interfaz de comunicación entre el y la computadora.

En particular, la computadora que se utiliza para este trabajo de investigación es marca Acer con las siguientes características en Hardware: procesador Intel Pentium I –80586– a 450 MHz de velocidad de procesamiento, memoria principal o RAM de 128 MB, memoria en disco duro de 4 GB, video controlador de gráficos SiS530 y monitor SVGA de 14 pulgadas con resolución de 800 x 600 píxeles y, además, trabaja bajo plataforma Windows 95.



Figura 3.2.6

Sistema de anemometría de hilo caliente y de adquisición de datos.



En la Figura 3.2.7 se proporciona una imagen del módulo principal del anemómetro de hilo caliente, así como del sistema de calibración. El primero incluye la electrónica básica del sistema, que es controlada desde la computadora a través del software "Streamware" desarrollado por el fabricante del equipo Dantec Dynamics.

Asimismo, el "Streamware" permite definir la siguiente configuración del "Streamline": puertos serial y paralelo, sensores de hilo caliente y de temperatura, portasensores, cables, así como la lectura, el procesamiento y la presentación de datos, entre otros parámetros. En tanto, el segundo funciona a partir del suministro de un flujo de aire presurizado, previamente filtrado, cuya velocidad media también la calcula el "Streamware".



Figura 3.2.7

Módulo principal y sistema de calibración del hilo caliente.



La Figura 3.2.8 contiene un acercamiento del equipo de calibración. En dicho sistema, se especifica la dirección del flujo de aire que pasa por medio de una tobera, para este caso, con un área de salida de 120 mm^2 y un diámetro de entrada de 12 mm . Así, el sistema de calibración dispone de toberas intercambiables que le permiten cubrir otros rangos de velocidad media entre $0.02 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y Mach 1.

Ahora, en la parte superior se tiene el dispositivo de sujeción del sensor, el cual se puede girar con el objeto de obtener la sensibilidad direccional del hilo caliente. Por último, aparece el sistema de filtrado de partículas de aire, clase cuatro, $< 50 \mu\text{m}$, que funciona bajo el suministro de aire comprimido, tal como se muestra en el manual de Dantec Dynamics (1996) [92].

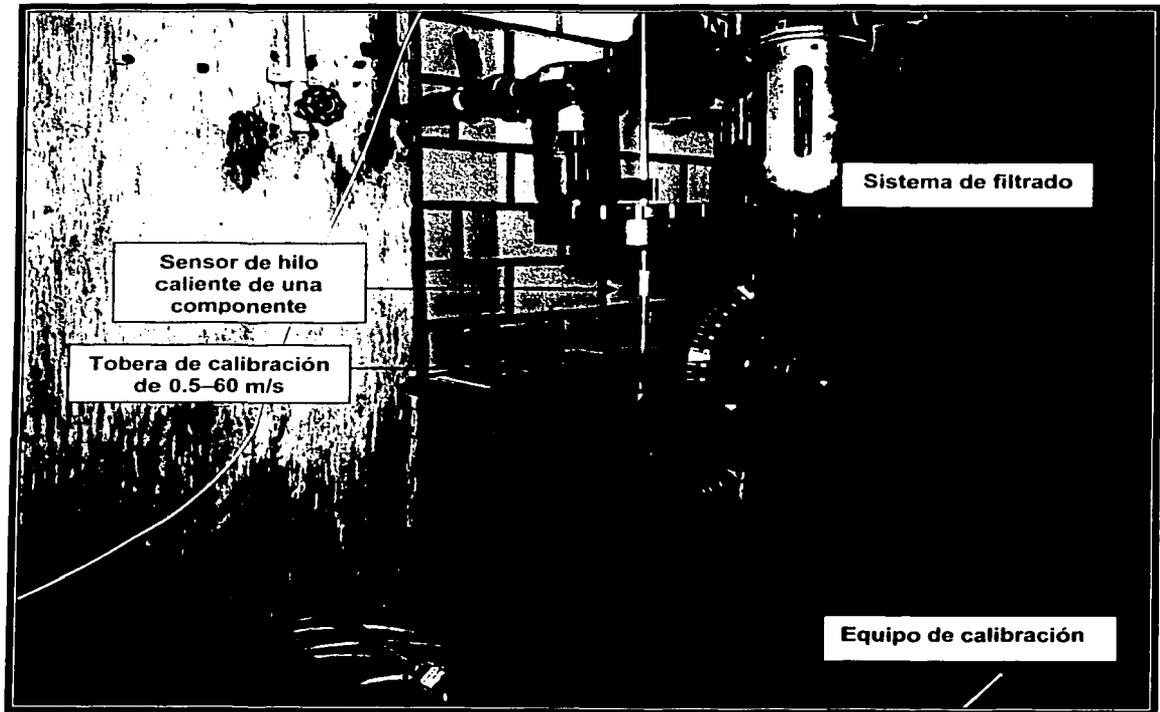
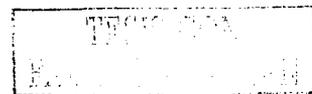


Figura 3.2.8

Sistema de calibración e hilo caliente.



Finalmente, en la Figura 3.2.9 se observa una vista lateral del brazo mecánico diseñado, cuyo fin es sustentar al portasensor de hilo caliente. En particular, el brazo está formado por una barra circular de acero inoxidable de 19/32 pulgadas de diámetro, dos rectángulos de hierro y cuatro espárragos de aluminio sostenidos por medio de dos placas cuadradas de acrílico fijadas a la máquina posicionadora 3D. Esta última se controla directamente desde la computadora a través del "Streamware".

Tanto el brazo como las placas fueron diseñados y fabricados específicamente para este trabajo de investigación —como se indica en el Apéndice A, Plano A-004—. Aunado a esto, en los conductos rectangulares se señala el sistema de coordenadas x , y sobre el cual trabaja la máquina posicionadora 3D y, por último, se distingue el sensor de hilo caliente colocado paralelamente en la dirección axial al flujo.

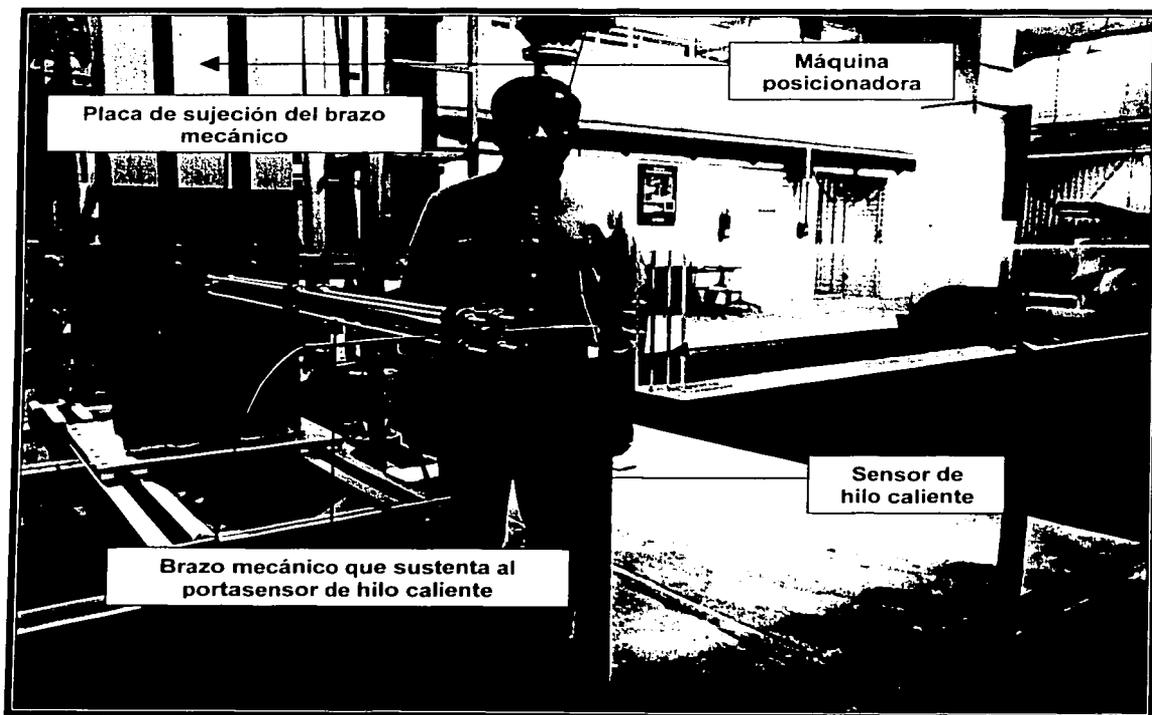


Figura 3.2.9

Vista del brazo mecánico que sustenta al portasensor de hilo caliente.

3.3 Calibración de la sonda de hilo caliente

Para poder realizar tanto las mediciones de velocidades medias como las de las fluctuaciones de velocidad es necesario llevar a cabo la calibración de la sonda de hilo caliente y, con ello, obtener su curva de respuesta o curva de calibración. Inicialmente, Bruun (1996) [93] señaló que en una sonda de un sólo hilo, la relación de calibración es unidimensional y, por tanto, se puede expresar como:

$$\dot{E} = F(\bar{U}) \quad (3.3.1)$$

donde \dot{E} es la salida de voltaje del anemómetro y \bar{U} es la componente de la velocidad media en la dirección del flujo.

Debido a las características individuales de cada sonda, incluyendo los posibles cambios en la temperatura del flujo, es necesario realizar una calibración de la misma cada vez que se use para un experimento.

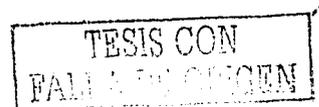
Para ello, la sonda se debe colocar en un flujo con una velocidad media de referencia conocida \bar{U}_R y de baja intensidad de turbulencia; es decir, del orden de $Tu < \sim 0.5\%$. Asimismo, la velocidad media del flujo debe ser perpendicular al hilo, mientras que el soporte de la sonda debe estar colocado paralelamente en la dirección del flujo medio. En particular, en un túnel de viento la velocidad media de referencia \bar{U}_R se logra medir colocando un tubo de Pitot cerca de la sonda de hilo caliente, siempre que el perfil de velocidad media sea uniforme.

Ahora, si se emplea una tobera de calibración como la que se muestra en la Figura 3.2.8, con el fin de determinar la \bar{U}_R , se podrá obtener la \bar{U}_R a partir de la caída de presión que se da a través de ésta. Para ello, la sonda se sitúa inmediatamente corriente abajo de la tobera, de tal manera que la presión estática correspondiente P sea igual a la presión atmosférica P_{atm} .

En este sistema, al medir la presión total correspondiente P_o —la cual es igual a la presión de estancamiento en el interior de la cámara de la tobera— con respecto a la P_{atm} , la velocidad media del flujo se evalúa, según la ecuación de Bruun (1996) [93]:

$$P_o - P_{atm} = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 \quad (3.3.2)$$

donde ρ es la densidad del fluido. El propósito de la calibración es el de obtener un conjunto de puntos entre la sonda y el elemento que se ha tomado como referencia — \dot{E}_R, \bar{U}_R —, que generalmente son de 10 a 30 puntos, espaciados uniformemente en un rango seleccionado de velocidad $\bar{U}_{R, \min}$ a $\bar{U}_{R, \max}$.



A causa de las fluctuaciones que ocurren aún en los mejores equipos de calibración, es necesario que los puntos de referencia \bar{E}_R y \bar{U}_R deban ser medios por encima de un periodo de tiempo de 10 a 30 segundos.

Asimismo, en pruebas de simulación numérica hechas por Swaminathan *et. al.* (1984) [94] se encontró que, para aplicaciones prácticas, se tenían resultados suficientemente aceptables con un conjunto de 20 a 30 puntos. Posteriormente, estos resultados fueron validados por la investigación experimental realizada por Bruun *et. al.* (1988) [95] sobre calibraciones de sondas de hilo caliente, quien determinó que con el empleo de 10, 20 y 40 puntos de calibración se obtienen resultados similares a los conseguidos cuando se utiliza un mayor número de puntos.

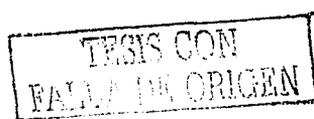
Por esta razón, para reducir la incertidumbre en los datos de calibración se debe tener mucho cuidado durante la misma, ya que un anemómetro de temperatura constante tiene una alta respuesta a la frecuencia, por lo que es recomendable calibrar la sonda en el equipo con el que serán tomadas las mediciones, puesto que las perturbaciones ocasionadas tanto por la sonda como por su soporte, así como la influencia de la geometría del equipo de prueba serán las mismas durante la calibración y el experimento. Sin embargo, en la práctica no siempre es posible llevar a cabo la calibración en sitio.

En el presente trabajo se ha utilizado una tobera relativamente pequeña, la cual se encuentra situada en la parte superior interna del sistema de calibración.

En tanto, en el momento de seleccionar la ecuación de respuesta del hilo caliente, se debe decidir, qué es lo que se desea obtener de la misma: alta precisión o facilidad de manejo. A fin de demostrar que la ecuación seleccionada tiene una buena exactitud, es necesario reducir al mínimo cualquier error en la calibración, seleccionar un método apropiado en el ajuste de curvas, así como precisar la incertidumbre resultante. Para ello, la exactitud del equipo de calibración debe ser mejor por sí misma que la requerida por el anemómetro de hilo caliente, además de poseer características metrológicas suficientemente estables y conocidas.

Por otra parte, con el objeto de optimizar las constantes de calibración que aparecen en la ecuación del hilo caliente, $\hat{E} = F(\bar{U})$, se debe emplear un método adecuado en el ajuste de curvas. En particular, uno de los métodos empleados es el de mínimos cuadrados, el cual está basado en la "suma de los cuadrados de las diferencias de los errores de voltaje" –SCDEV–, definido por Bruun (1996) [93] como:

$$SCDEV = \sum_{i=1}^N (E_R - E_C)^2 \quad (3.3.3)$$



Alternativamente, la SCDEV se obtiene del modo siguiente:

$$SCDEV = \sum_{i=1}^N (E^2_R - E^2_C)^2 \quad (3.3.4)$$

De esta forma, Pitts y McCaffrey (1986) [96] simplificaron el procedimiento del ajuste de curvas, siempre que se use junto con la ecuación de la ley de las potencias:

$$E^2 = A + B U^n \quad (3.3.5)$$

De la ecuación (3.3.4), se tiene que \hat{E}_R es el voltaje medido durante la calibración y \hat{E}_C es el voltaje calculado a partir de la ecuación de respuesta seleccionada, $\hat{E} = F(\hat{U})$. Asimismo, se considera la velocidad media de referencia \hat{U}_R utilizada en la calibración. Por tanto, Bruun (1996) [93] obtuvo la siguiente expresión:

$$\hat{E}_C = F(\hat{U}_R) \quad (3.3.6)$$

En general, el método de la SCDEV se aplica para cualquier función analítica; y asimismo, determina los valores óptimos de las constantes de calibración involucradas.

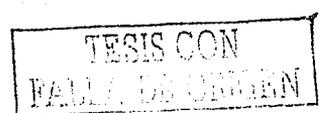
Adicionalmente, Bruun (1996) [93] propuso que en caso de querer comparar la exactitud de ajuste de la ecuación de respuesta del hilo caliente, se emplea la desviación estándar normalizada ϵ_U :

$$\epsilon_U = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1 - U_R}{U_C} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3.3.7)$$

Invertiendo la ecuación (3.3.6) y mediante el uso de las constantes de calibración ya conocidas, Bruun (1996) [93] obtuvo la \hat{U}_C :

$$\hat{U}_C = F^{-1}(\hat{E}_R) \quad (3.3.8)$$

Así, con esta formulación, $\hat{E} = F(\hat{U})$, se hace imprescindible el proceso de inversión para obtener información de la velocidad media requerida. Sin embargo, Bruun (1996) [93] encontró que matemáticamente no existe razón por la que la ecuación del hilo caliente se exprese como $\hat{U} = F(\hat{E})$.



Por tal razón, Bruun (1996) [93] recurrió a la siguiente ecuación polinomial presentada por George *et. al.* (1981) [97] y (1989) [98]:

$$\bar{U} = A + B\bar{E} + C\bar{E}^2 + D\bar{E}^3 + F\bar{E}^4 + \dots \quad (3.3.9)$$

De este modo, la ecuación (3.3.9) expresa la velocidad media \bar{U} como función de \bar{E} , de tal manera que esto representa una ventaja computacional, ya que la velocidad media requerida \bar{U} se obtiene directamente a partir de esta ecuación. En principio, este método ya ha sido probado a través de un programa de cómputo, el cual ajusta los datos experimentales a un polinomio de décimo grado. Sin embargo, se encontró que la solución del polinomio llega a ser inestable cuando el orden es mayor a cuatro. Complementariamente, Bruun (1996) [93] refirió que la exactitud en el ajuste polinomial como función de \bar{E}^2 , ha sido también investigada por Swaminathan *et. al.* (1986) [99], quien aplicando el método de mínimos cuadrados a modelos de segundo y tercer orden, planteó el siguiente polinomio:

$$\bar{U} = A + B\bar{E}^2 + C(\bar{E}^2)^2 \quad (3.3.10)$$

$$\bar{U} = A + B\bar{E}^2 + C(\bar{E}^2)^2 + D(\bar{E}^2)^3 \quad (3.3.11)$$

Asimismo, Bruun *et. al.* (1988) [95] con base en los diferentes métodos de calibración previamente expuestos, presentó resultados comparativos de exactitud entre diferentes ecuaciones de respuesta del hilo caliente, obtenidos para una sonda de un sólo hilo, marca Dantec Dynamics 55P01, y realizados en un rango de 5–50 $\frac{m}{s}$.

El propósito fue resaltar la mayor exactitud que tiene cada ecuación de calibración.

Por lo tanto, la Tabla 3.3.1 muestra algunos valores del porcentaje de exactitud ϵ_b , mediante los métodos de la ley de las potencias –ecuación 3.3.5–, así como el de la ley de las potencias extendidas:

$$\bar{E}^2 = A + B\bar{U}^{1/2} + C\bar{U} \quad (3.3.12)$$

Los resultados mostraron una gran similitud con los resultados obtenidos por Bruun y Tropea (1980) [100] y (1985) [101], así como por Swaminathan *et. al.* (1986) [99].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.3.1

Resultados obtenidos con los métodos de la ley de las potencias simple y extendida.

	A	B	C	n	ϵ_0 (%)
$\hat{E}^2 = A + BU^n$					
Solución simultánea para A, B y n	5.980	4.608	—	0.4137	0.11
Con Incremento en n	6.018	4.587	—	0.4145	0.15
Con Incremento en A	6.005	4.592	—	0.4143	0.15
$\hat{E}^2 = A + BU^{n/2} + CU$	7.544	3.449	- 0.005	0.5	0.46

En la Tabla 3.3.1 se observa la buena exactitud de $\epsilon_0 \cong 0.11-0.15$ % que se tiene en los tres casos de la ecuación (3.3.5). En particular, dentro de estos tres casos la mejor exactitud corresponde a la solución simultánea para A, B y n, sólo que la complejidad de este método no justifica dicha exactitud, sobre todo si se usa un sistema de cómputo para procesar la información, ya que es un método algo pesado y, por lo tanto, tarda mucho tiempo en converger, de tal manera que no se recomienda.

Mientras que, para la ecuación (3.3.12), el valor obtenido para C (~ - 0.005) indica que el término CU se considera como una pequeña corrección a la ley de las potencias extendida; sin embargo, el porcentaje de ϵ_0 se ve incrementado hasta tres o cuatro veces más su valor comparado con el de la ley de las potencias simple.

Finalmente, todos estos resultados se usaron como datos de entrada a un programa de ajuste polinomial.

A su vez, los resultados obtenidos sirvieron como parámetros para comparar la exactitud del ajuste polinomial que se tiene entre polinomios cuadráticos, cúbicos y de cuarto grado en \hat{E} , así como las dos variaciones de la ecuación polinomial en \hat{E}^2 propuesta por Swaminathan *et. al.* (1986) [99].

De esta manera, en la Tabla 3.3.2 se observa claramente que los valores obtenidos mediante estos ajustes no son tan buenos como los obtenidos en la solución simultánea para A, B y n, ecuación (3.3.5). Por tanto, para alcanzar esta exactitud, es necesario utilizar el polinomio de cuarto grado en \hat{E} o el de tercer grado en \hat{E}^2 . Así, estas conclusiones son consistentes con la mayoría de los resultados obtenidos por Swaminathan *et. al.* (1986) [99].

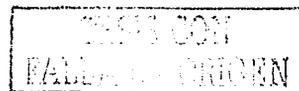


Tabla 3.3.2

Valores obtenidos a través del ajuste de polinomios de segundo, tercero y cuarto grado.

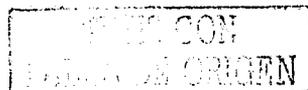
Ecuación	ϵ_0 (%)
$\dot{U} = A + B\dot{E} + C\dot{E}^2$	2.5
$\dot{U} = A + B\dot{E} + C\dot{E}^2 + D\dot{E}^3$	0.24
$\dot{U} = A + B\dot{E} + C\dot{E}^2 + D\dot{E}^3 + F\dot{E}^4$	0.15
$\dot{U} = A + B(\dot{E}^2) + C(\dot{E}^2)^2$	0.80
$\dot{U} = A + B(\dot{E}^2) + C(\dot{E}^2)^2 + D(\dot{E}^2)^3$	0.15

Por ello, con base en los dos métodos expuestos en forma comparativa, resulta que el mejor ajuste corresponde al polinómico, ya que este cuenta con una muy buena exactitud de $\epsilon_0 \sim 0.15\%$ y, sobre todo, no requiere de sofisticados equipos de cómputo, corriendo adecuadamente en una computadora personal. En este sentido, para efectos de llevar a cabo la calibración de la sonda de hilo caliente del presente trabajo, se utiliza la ecuación polinomial (3.3.9) de cuarto grado en \dot{E} .

Por otra parte, después de mencionar brevemente dos de los métodos que existen para obtener la curva de respuesta o curva de calibración del hilo caliente y haber escogido el tipo de ecuación que se emplea en el ajuste de las curvas de calibración, se procede a calibrar la sonda. Para ello, se sitúa el sensor en el sistema de calibración, donde la pérdida de calor del hilo caliente se debe al flujo de aire que sale por la tobera de calibración y que se hace pasar a través del hilo. De esta forma, se obtienen los coeficientes A, B, C, D y F de la ecuación (3.3.9). Como ya se ha mencionado, el fluido que se utiliza en la calibración debe tener las mismas propiedades y concentraciones que el fluido empleado en el experimento.

En general, el método de calibración empleado ajusta la curva por medio de una regresión polinomial de cuarto grado en U, en donde la variable independiente es la velocidad media calculada y la variable dependiente es el voltaje medido en el hilo, cuyo voltaje es asociado a cada velocidad media medida. En particular, en este estudio, el procedimiento de calibración se repitió varias veces hasta lograr obtener la mejor curva de ajuste. La información generada en el proceso de calibración se muestra en las Tablas 3.3.3 y 3.3.4.

Finalmente, el sistema calcula 20 velocidades medias obtenidas a partir de la curva de ajuste encontrada, la cual pasa por los puntos experimentales, tal y como se muestran en las Figuras 3.3.1 y 3.3.2. En estas mismas tablas se puede observar que la relación entre la velocidad media calculada y el voltaje medido no es lineal, así como los polinomios que definen este comportamiento.



Ambos datos se obtuvieron con una respuesta de frecuencia de 1 kHz para un valor de 1,024 muestras por canal. Asimismo, con el objeto de evitar fluctuaciones tanto en la calibración como en la medición de los perfiles de velocidades medias y fluctuantes tanto de la aceptación del equipo diseñado como los de las diferentes T, se utilizó un intervalo de retardo de 45 segundos en cada punto medido.

La razón por la cual se escogieron los siguientes rangos de calibración: 0.5–8 y 0.5–6 $\frac{m}{s}$, fue por limitaciones propias del turbosoplador para generar un flujo de aire superior a los 6 $\frac{m}{s}$. Con base en esto se definieron las diferentes T, como se vio en la Sección 1.2. Así, la Tabla 3.3.5 muestra la dependencia de cada rango de calibración asociado con cada una de las velocidades medias generadas en los conductos rectangulares.

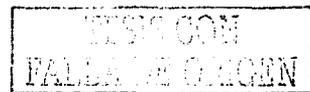


Tabla 3.3.3

Valores obtenidos, tanto de velocidades medias como de voltajes, en un rango de 0.5–8 $\frac{m}{s}$.

\bar{U} (m/s)	\bar{E} (Volts)
0.473	1.470
0.588	1.491
0.676	1.506
0.787	1.523
0.885	1.537
1.037	1.556
1.221	1.577
1.411	1.597
1.623	1.617
1.880	1.640
2.163	1.664
2.534	1.689
2.933	1.715
3.395	1.742
3.892	1.768
4.495	1.796
5.216	1.828
6.042	1.866
6.965	1.899
8.096	1.935

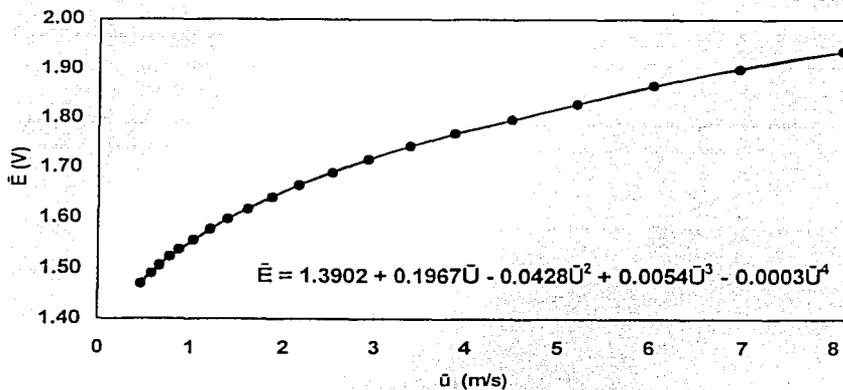


Figura 3.3.1

Curva de calibración de un solo hilo obtenida en un rango de velocidad media entre 0.5 a 8 $\frac{m}{s}$.

Tabla 3.3.4

Valores obtenidos, tanto de velocidades medias como de voltajes, en un rango de 0.5-6 $\frac{m}{s}$.

\bar{u} (m/s)	\bar{E} (Volts)
0.495	1.490
0.563	1.501
0.643	1.514
0.730	1.528
0.840	1.545
0.963	1.561
1.103	1.578
1.252	1.595
1.448	1.615
1.649	1.634
1.860	1.653
2.131	1.675
2.418	1.696
2.757	1.718
3.150	1.743
3.623	1.769
4.099	1.793
4.661	1.820
5.330	1.848
6.052	1.882

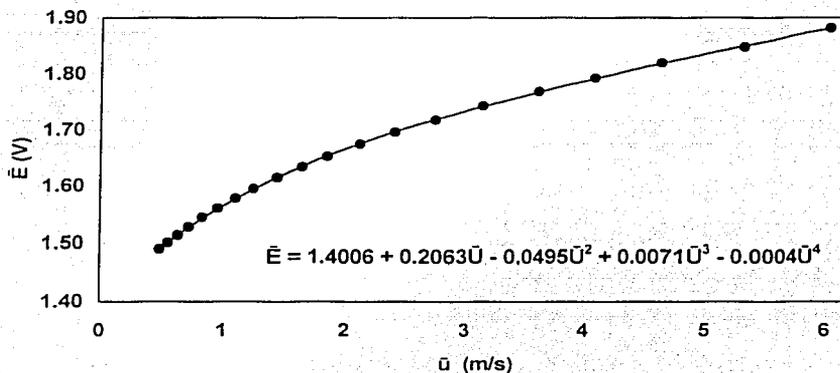


Figura 3.3.2

Curva de calibración de un solo hilo obtenida en un rango de velocidad media entre 0.5 a 6 $\frac{m}{s}$.

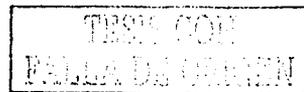


Tabla 3.3.5

Correspondencia entre rangos de calibración y velocidades utilizadas en el experimento.

Rangos de calibración empleados	Velocidades medias utilizadas en cada T	Valores de T
0.5–8 $\frac{m}{s}$	5 y 6 $\frac{m}{s}$	Chorro solo y T = 1
0.5–6 $\frac{m}{s}$	1, 2 y 4 $\frac{m}{s}$	T = 0.25, T = 0.5, T = 2 y T = 4

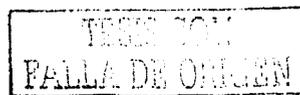
En conclusión, se debe tener presente que cualquier medición que se haga debe estar dentro del rango de calibración establecido, de tal forma que las mediciones de velocidad media que se aproximen a los límites de éste y, sobre todo, las que estén fuera del mismo ocasionarán lecturas incorrectas.

3.4 Metodología empleada en la experimentación

El proceso de mezclado se puede caracterizar a través de la medición de la distribución de velocidades medias, así como de las fluctuaciones de velocidad u'_{rms} ; es decir, $\sqrt{u'^2}$, siendo estas últimas las que definen las características turbulentas del flujo, donde u'_{rms} es la dispersión de velocidad de RMS del flujo.

Al respecto, en esta sección se describe la metodología práctica que se emplea en la medición experimental de los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$, mediante el anemómetro de hilo caliente. En seguida se especifican las etapas y pasos a seguir señalados en el manual de Dantec Dynamics (1996) [92]:

1. **Puesta en marcha del "Streamline –módulo principal–"**: inicialmente, se empieza con el encendido del módulo principal y del sistema de adquisición de datos. En tanto, en el módulo principal se conectan tanto la sonda de hilo caliente como la de temperatura, tal y como se muestra en las Figuras 3.2.6 y 3.2.7.
2. **Activación de la interfaz entre el "Streamline" y el sistema de adquisición de datos**: el siguiente paso consiste en habilitar la conexión entre el "Streamline" y el sistema de adquisición de datos, abriendo el software "Stat-95" instalado en el disco duro de la unidad C de la computadora, como se aprecia en las Figuras 3.2.6 y 3.2.7.



3. **Activación del software "Streamware":** seguidamente, se abre el software "Streamware" que se encuentra también instalado en el disco duro de la unidad C. A continuación se procede a crear la base de datos donde se almacenan todos los proyectos experimentales. Aquí se realiza la configuración completa del hardware que requiere el "Streamline", tales como los puertos serial y paralelo, portasensor, sensores de temperatura y de hilo caliente, cables, etc., así como la lectura, el procesamiento y presentación de datos. Una vez terminada la configuración se efectúa el autobalanceo del equipo, como se representa en la Figura 3.2.6.
4. **Calibración de la sonda hilo caliente:** en esta parte se escoge la tobera apropiada para un rango de velocidad media determinado. Posteriormente, se coloca el sensor de hilo caliente en el sistema de calibración y se abre la línea que suministra el aire comprimido que pasa a través del sistema de filtrado. Finalmente, a través del "Streamware" se lleva a cabo la calibración automática del sensor. De esta forma, se tiene la curva de respuesta o curva de calibración obtenida de las mediciones de valores medios considerando una respuesta no lineal, como se observa en las Figuras 3.2.7 y 3.2.8.
5. **Activación de la máquina posicionadora 3D:** adicionalmente, se abre una ventana del "Streamware" que permite controlar el desplazamiento espacial x , y del sensor de hilo caliente. Asimismo, el "Streamware" realiza un posicionamiento múltiple a través del chorro *libre* generando una malla de puntos bidimensional. En particular, en esta ventana se llena una tabla que contenga las coordenadas de desplazamiento del sensor a lo largo de la dirección axial al flujo, así como en la dirección transversal a ésta, como se muestra en las Figuras 3.2.6 y 3.2.9.
6. **Análisis de resultados:** por último, el "Streamware" genera en forma automática una nueva ventana que permite observar las gráficas de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$ ambas contra posición; es decir, \bar{u} vs. y y u'^2 vs. y . De igual forma, el "Streamware" crea un archivo que contiene los resultados experimentales presentándolos en forma tabular. Los datos almacenados son, respectivamente, los puntos que delimitan cada perfil –posición–, los datos de velocidad media – \bar{u} – y por último, datos de la raíz cuadrática media del cuadrado de la fluctuación de la velocidad – u'^2 –. Los valores listados en estas tablas se pueden leer fácilmente en algún otro tipo de software comercial para su posterior análisis y procesamiento. En particular, los datos de esta investigación fueron procesados en Excel 2000 de Microsoft, como se señala en la Figura 3.2.6.

3.5 Pruebas de aceptación del equipo diseñado

Esta sección trata de las pruebas de validación del equipo diseñado, así como del buen funcionamiento del anemómetro de hilo caliente. Esto es, ya una vez definido el problema de investigación, hecha la descripción tanto del equipo diseñado como del sistema de medición, hablado sobre la calibración de la sonda de hilo caliente y, además, explicada la metodología que se usó para determinar los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$; el siguiente paso es, antes de realizar propiamente la experimentación, validar el buen funcionamiento del equipo diseñado.

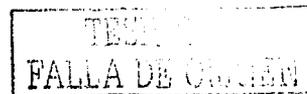
Asimismo, la validación se efectúa con el objeto de proporcionar la confianza necesaria en el resultado de cualquier medición y de esta manera, poder inferir en la toma de decisiones acerca del comportamiento de los chorros *libres* en coflujo objeto de estudio. En este sentido, se obtienen tres perfiles dimensionales de velocidad media y $\sqrt{u'^2}$ para tres distintas posiciones, de tal manera que los conductos rectangulares se dividen en forma equidistante a lo largo de la coordenada z en los siguientes tres puntos: superior, central e inferior, tal y como lo esquematiza la Figura 3.5.1. En particular, en cada uno de estos puntos, el sensor se desplaza a través del eje coordenado y de cada uno de los tres conductos, con el objeto de realizar un barrido en la dirección normal a la dirección principal del flujo y , en consecuencia, obtener los perfiles de velocidad media \bar{u} y $\sqrt{u'^2}$.

Por lo anterior, el sensor de hilo caliente es colocado inmediatamente a una distancia en $x = 1$ mm de separación de los conductos, de modo que se obtenga una velocidad media máxima posible de $6 \frac{m}{s}$ en cada uno de estos conductos, lo que conduce a emplear sólo un rango de calibración de $0.5-8 \frac{m}{s}$. En tanto, los resultados de los perfiles de velocidad media y fluctuante se obtienen de manera dimensional y se muestran en las Figuras 3.5.2, 3.5.3 y 3.5.4. Asimismo, la Tabla 3.5.1 contiene los tres valores promedio calculados del número de Reynolds para cada uno de los tres conductos. A partir de esta tabla, se puede ver que estos valores promedio se encuentran en el orden de 10^4 .

Tabla 3.5.1

Valores promedio del número de Reynolds calculados a la salida de cada uno de los tres conductos.

Conducto uno; $Re, \times 10^4$	Conducto dos; $Re, \times 10^4$	Conducto tres; $Re, \times 10^4$
0.46	0.45	0.45



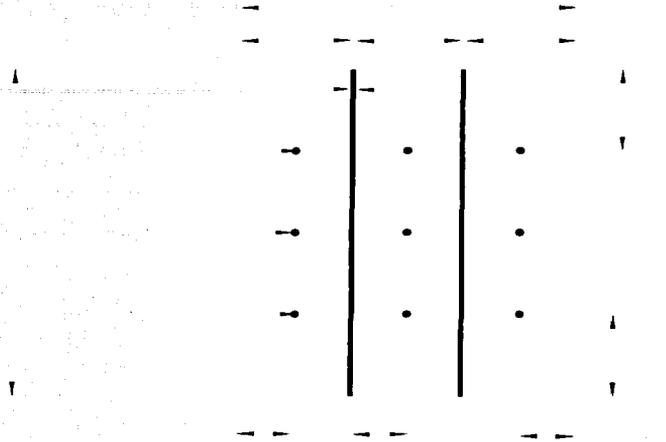


Figura 3.5.1

Vista frontal de los conductos rectangulares del equipo diseñado.

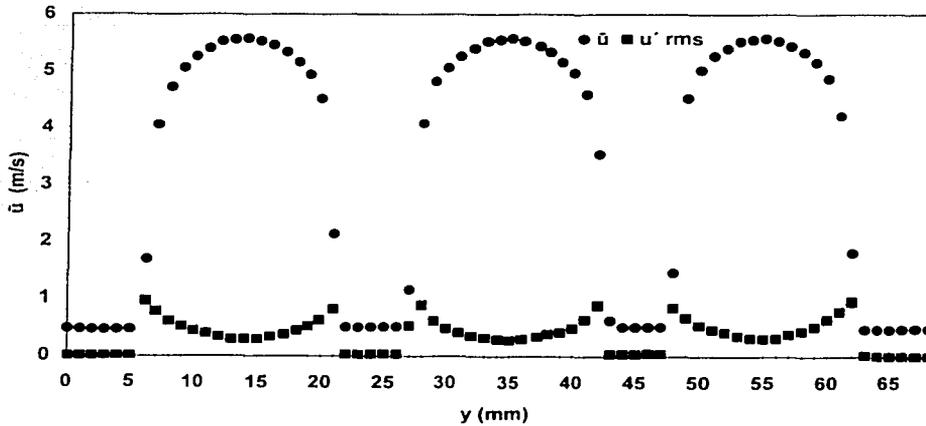
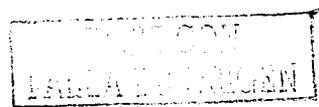


Figura 3.5.2

Perfiles de velocidad media y fluctuante medidos en el punto superior.



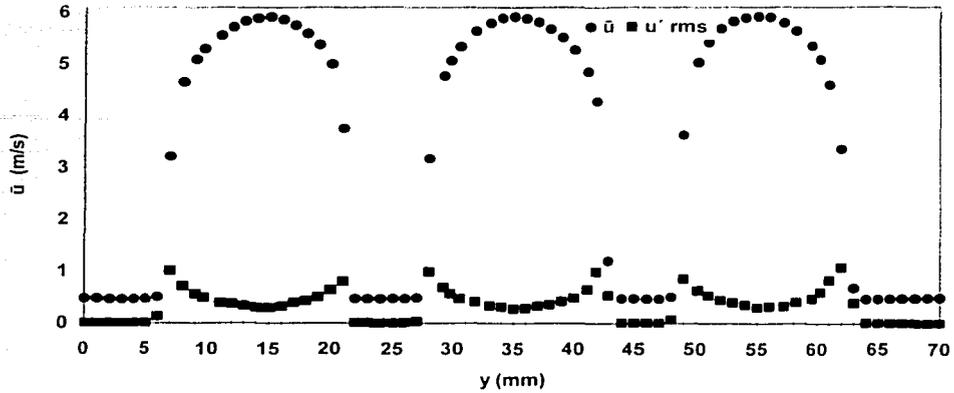


Figura 3.5.3

Perfiles de velocidad media y fluctuante medidos en el punto central.

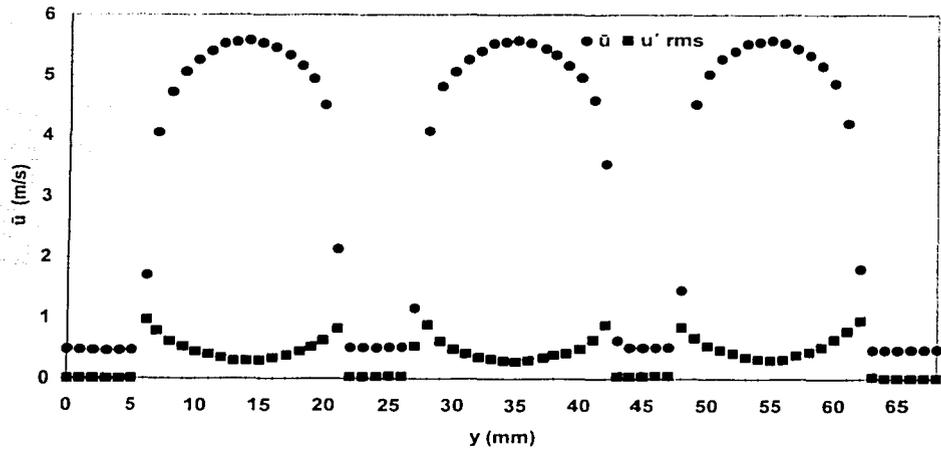


Figura 3.5.4

Perfiles de velocidad media y fluctuante medidos en el punto inferior.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En principio, se pueden observar claramente los tres perfiles típicos de los flujos desarrollados en conductos planos, incluyendo las discontinuidades causadas por el espesor del acrílico de las dos placas internas, las cuales se pueden apreciar en los tres puntos medidos: superior, central e inferior.

En general, los tres perfiles \bar{u} mantienen tanto velocidades medias como fluctuaciones de velocidad constantes en cada uno de los conductos para cada punto medido. Sin embargo, existe una pequeña diferencia de velocidad media entre el punto central y los dos puntos restantes. Esta diferencia radica en que la máxima velocidad media de $\bar{u} = 5.924 \frac{m}{s}$ que se tiene en la parte central de los conductos es mayor que las velocidades medias de $\bar{u} = 5.579 \frac{m}{s}$ desarrolladas en los puntos superior e inferior, respectivamente. Si es así, se puede pensar que el flujo tiene, por tanto, un perfil de velocidades medias semejante al parabólico, siendo la velocidad media máxima en el centro del conducto. Por lo cual hubiese sido erróneo haber encontrado diferencias de velocidades medias entre estos últimos dos puntos, cosa que no sucedió. Asimismo, el valor del número de Reynolds es poco mayor en el conducto uno, lo que indica que existe menos fricción en la lona, por lo que la velocidad media es mayor. De igual manera, se observa un ensanchamiento mayor en este mismo conducto, lo que refleja un pequeño incremento en el gasto másico calculado a la salida, como se puede apreciar en la Tabla 3.5.2. El Apéndice C incluye la memoria de cálculo tanto de los valores de los números de Reynolds como de los gastos másicos.

Tabla 3.5.2

Valores de gasto másico calculados inmediatamente a la salida de cada conducto.

Conducto uno	Conducto dos	Conducto tres
\bar{m} (kg/s)	\bar{m} (kg/s)	\bar{m} (kg/s)
0.0097	0.0095	0.0095

Por lo tanto, si estas condiciones se cumplen, se puede concluir que mediante estas sencillas pruebas el equipo diseñado construido con acrílico y el anemómetro de hilo caliente funcionan correctamente, razón por la cual el sistema en general queda validado. Lo que sigue es determinar la aerodinámica de los chorros *libres* planos paralelos en coflujo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

De los tres capítulos antes estudiados éste es uno de los más importantes, ya que incorpora los resultados experimentales tales como: los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$, así como para un chorro *libre* plano –sólo el central–, el comportamiento que presenta la variación del semiancho del chorro, la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro, ambas como función de la dirección principal del flujo y, finalmente, la comparación del campo de velocidad media $\bar{u}(x, y)$, obtenido en este estudio, de un solo chorro *libre* plano contra la predicción teórica reportada en la literatura especializada en el tema.

En particular, se realizaron 126 gráficas de velocidad media $\bar{u}(x, y)$, 126 gráficas de la parte fluctuante u'^2 , así como una gráfica que muestra la variación del semiancho del chorro y una más que presenta el efecto de la evolución de la velocidad media máxima en el centro, ambas como función de la dirección principal del flujo. Por último, una gráfica que compara los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante u'^2 obtenidos en este trabajo, de un solo chorro *libre* plano contra las predicciones teóricas reportadas en la literatura especializada en el tema, sumando un total de 255 gráficas, de las cuales sólo se reportan las más representativas.

Con ello, se caracteriza el proceso de mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo para cinco T, definidas y descritas en la Tabla 4.1. Asimismo, en ella se indican las magnitudes de las velocidades medias que definen a cada T, mismas que se tienen en cada conducto, tal y como se representan en la Figura 3.2.3. En tanto, ambos campos se midieron inmediatamente a la salida de los conductos; es decir, a una \bar{u} de salida en $x = 1$ mm y a diferentes distancias de 8H en $x = 12$ cm, de 16H en $x = 24$ cm y de 24H en $x = 36$ cm veces el ancho H de un solo conducto. En este sentido, la Figura 4.1 esquematiza la nomenclatura básica usada.



Figura 4.1

Nomenclatura empleada que describe los perfiles de velocidad media y u'_{rms} en un proceso de mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cabe mencionar que toda la experimentación se realizó de acuerdo con la metodología descrita en el Capítulo 3, Sección 3.4 y en las siguientes condiciones experimentales:

1. La velocidad media proveniente del turbosoplador se regula mediante tres válvulas tipo mariposa de dos pulgadas de diámetro de hierro modular cromado controladas manualmente.
2. Se emplea aire comprimido como fluido manométrico a una temperatura promedio de 20.3° C para calibrar la sonda de hilo caliente, existiendo una variación máxima de 1.5° C entre cada uno de los dos rangos de calibración previamente señalados.
3. La presión atmosférica que se tiene en el laboratorio es de 78,000 Pa.
4. La densidad del aire promedio utilizada como fluido de trabajo se obtiene de la ecuación de gas ideal:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} = \frac{78,000 \text{ Pa}}{287 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \cdot 293.45 \text{ K}} = 0.93 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad (4.1)$$

Así, con los valores de velocidades medias indicados en la Tabla 4.1 se pueden seleccionar los rangos de calibración que se usan en la medición de cada T_i , mismos que se muestran en las Tablas 3.3.5 y 4.2.

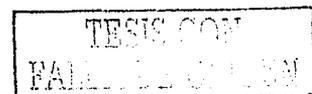


Tabla 4.1

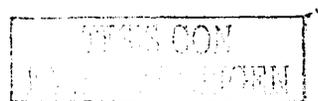
Valores de T estudiadas y de velocidades medias.

$T = \frac{\bar{u}_1}{u_2} = \frac{\text{chorro central}}{\text{chorros laterales}}$	Velocidades medias empleadas en cada T
1	Tres chorros a una misma velocidad media de 6 $\frac{m}{s}$
0.25	Dos chorros laterales a una misma velocidad media de 4 $\frac{m}{s}$ y el chorro central a una velocidad media de 1 $\frac{m}{s}$
0.5	Dos chorros laterales a una misma velocidad media de 4 $\frac{m}{s}$ y el chorro central a una velocidad media de 2 $\frac{m}{s}$
2	Dos chorros laterales a una misma velocidad media de 2 $\frac{m}{s}$ y el chorro central a una velocidad media de 4 $\frac{m}{s}$
4	Dos chorros laterales a una misma velocidad media de 1 $\frac{m}{s}$ y el chorro central a una velocidad media de 4 $\frac{m}{s}$
Un solo chorro central	Un chorro central a una velocidad media de 5 $\frac{m}{s}$

Tabla 4.2

Intervalos de calibración empleados en el presente trabajo.

Valores de T	Rangos de calibración empleados
Chorro solo y T = 1	0.5–8 $\frac{m}{s}$
T = 0.25, T = 0.5, T = 2 y T = 4	0.5–6 $\frac{m}{s}$



4.1 Validación del equipo diseñado

A partir de esta sección y en todas las sucesivas, se tratan con detalle los resultados alcanzados, correspondientes a los cuatro objetivos particulares planteados en el Capítulo 1, Sección 1.2.

Por otra parte, en la Sección 3.5 se presentaron, con resultados satisfactorios, las pruebas de aceptación del equipo diseñado, con el objeto de probar la similitud que existe entre los tres perfiles de velocidad media y fluctuante medidos a la salida de cada uno de los tres conductos, así como en tres puntos equidistantes a lo largo del eje z .

Ahora, se valida una vez más el buen funcionamiento del equipo de anemometría, obteniendo de esta manera los perfiles de velocidad media y u_{rms} para un solo chorro –el central– y en esta segunda ocasión se comparan estos resultados con trabajos previos reportados en la literatura especializada en el tema para un chorro *libre* plano turbulento. En particular, se recurre a Görtler 1942 [102], quien propuso la siguiente variable de semejanza para un perfil de velocidad media de un chorro *libre* plano turbulento:

$$\eta = \frac{\sigma y}{x} \quad (4.1.1)$$

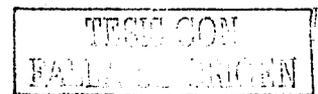
donde σ es una constante, mientras que y y x son las variables independientes en la dirección transversal a la dirección del flujo principal y en la dirección axial, respectivamente.

Asimismo, Görtler 1942 [102] obtuvo una solución teórica que predice la distribución de la velocidad media de un chorro *libre* plano turbulento, citada en White (1991) [24] como:

$$\frac{u}{u_{m\acute{a}x}} = \operatorname{sech}^2(\eta) \quad (4.1.2)$$

sustituyendo la ecuación (4.1.1) en la (4.1.2), la ecuación (4.1.2) toma la forma siguiente:

$$\frac{u}{u_{m\acute{a}x}} = \operatorname{sech}^2\left(\frac{\sigma y}{x}\right) \quad (4.1.3)$$



En efecto, esta distribución permite predecir con una muy buena aproximación los resultados experimentales para chorros *libres* planos turbulentos, de tal manera que si se hacen coincidir los valores en el punto medio de la velocidad, y_1 , con $u = \frac{u_{\max}}{2}$ y $\eta_1 = \text{sech}^{-2}(0.5) = 0.88$, se obtiene el siguiente valor para σ :

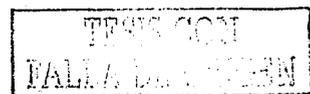
$$\sigma_{\text{chorro plano}} \approx 7.67 \quad (4.1.4)$$

Si se sustituye este valor en la ecuación (4.1.3) se establece la ecuación final que predice un perfil de velocidad media correspondiente a un chorro plano *libre* totalmente desarrollado:

$$\frac{u}{u_{\max}} = \text{sech}^2\left(7.67 \frac{y}{x}\right) \quad (4.1.5)$$

Por tanto, con la ecuación (4.1.5) se puede hacer una comparación entre el perfil de velocidad media obtenido en forma experimental con el equipo diseñado y el obtenido a través de la ecuación (4.1.5), deducida por Görtler 1942 [102]. Así, en la Figura 4.1.2 se muestran los resultados de ambos perfiles que aparecen normalizados con la u_{\max} , es decir, $\frac{u}{u_{\max}}$ y el semiancho del chorro compuesto A; es decir, $\frac{y}{A}$ para los ejes de la ordenada y abcisa, respectivamente.

En particular, el perfil experimental obtenido en el presente trabajo se obtiene con los datos medidos con el sensor de hilo caliente colocado a una distancia en x de 24H, lo cual equivale a la distancia máxima en x de 36 cm que se tiene en esta dirección, mientras que el perfil teórico se obtiene por medio de la ecuación (4.1.5), la cual se resuelve introduciendo los mismos valores experimentales anteriores, tal y como se puede observar en la Figura 4.1.



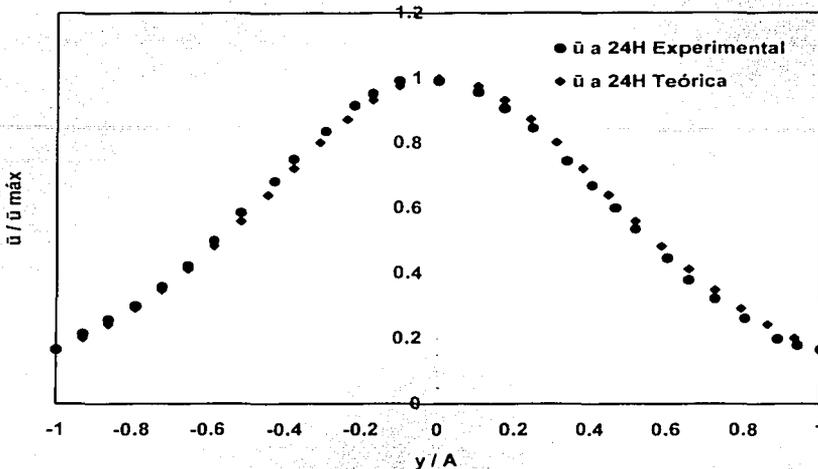


Figura 4.1.2

Comparación con el perfil teórico citado por White (1991) [24] y el obtenido en el presente estudio.

De los resultados, se observa que en forma general, a una distancia de 24H el chorro ha alcanzado su desarrollo; es decir, que a esta distancia cumple la condición de semejanza, notándose la distribución Gaussiana típica que presenta un chorro *libre* turbulento totalmente desarrollado, tal y como lo refirió White (1991) [24] en su libro. A su vez, el perfil teórico demuestra una buena similitud con el perfil experimental. Con esta comparación se puede afirmar que existe una buena concordancia entre los resultados de este trabajo y la ecuación teórica (4.1.5) reportada en la literatura especializada en el tema.

De igual manera, las Figuras 4.1.3 a 4.1.6 muestran los perfiles tanto de velocidad media \bar{u} como u'_{rms} para un solo chorro –el central–. Ambos perfiles se normalizan dividiendo la velocidad media \bar{u} entre la velocidad $\bar{u}_{\text{máx}}$; es decir, $\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{máx}}}$, así como dividiendo la posición transversal entre el semiancho del chorro compuesto A; es decir,

$\frac{y}{A}$

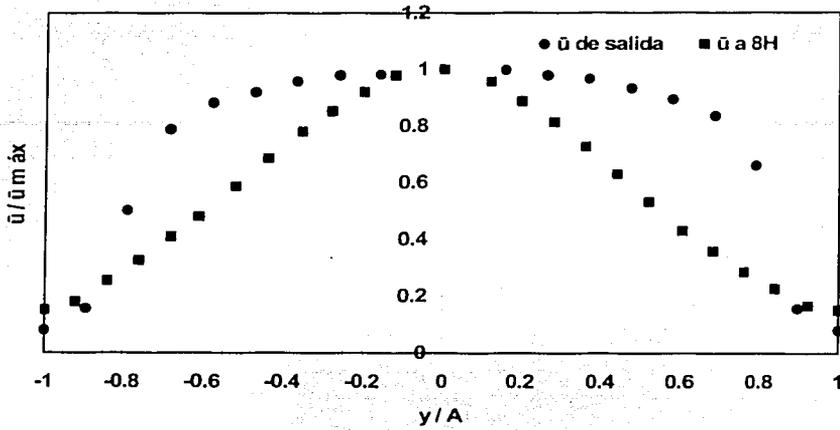


Figura 4.1.3
Perfiles de velocidad media—Chorro central.

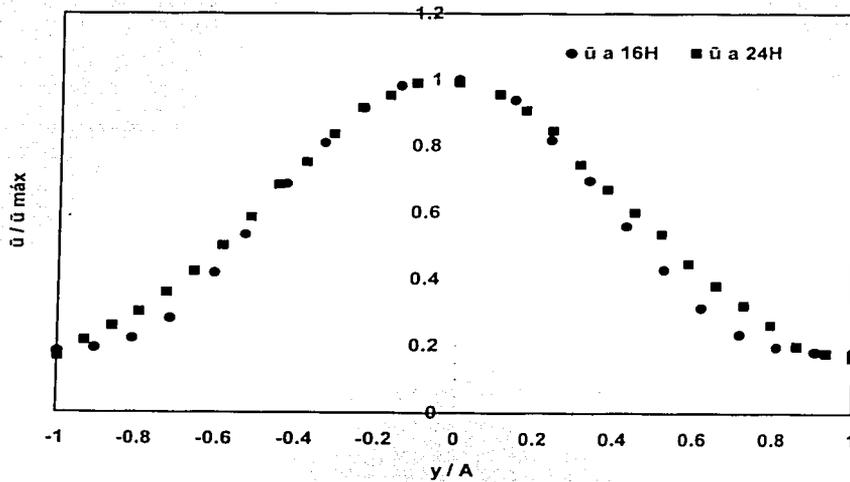


Figura 4.1.4
Perfiles de velocidad media—Chorro central.

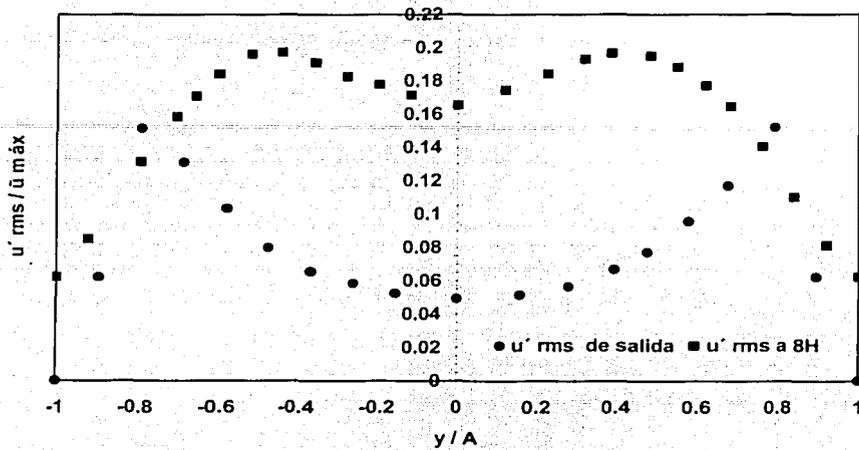


Figura 4.1.5

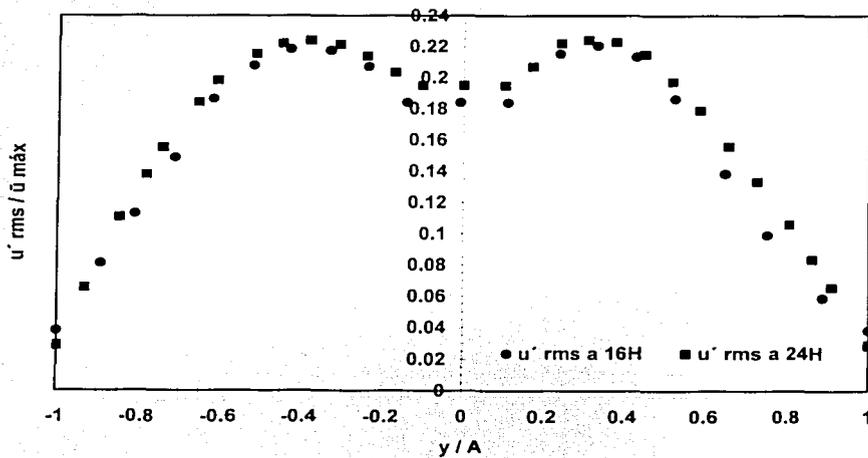
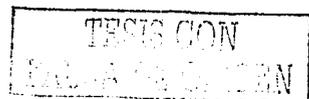
Perfiles u'_{rms} -Chorro central.

Figura 4.1.6

Perfiles u'_{rms} -Chorro central.

Así también, se presenta el valor calculado del número de Reynolds a una distancia en x de 1 mm de la zona de salida del conducto central, el cual se reporta, también, en un orden de magnitud de 10^4 .

Tabla 4.5

Número de Reynolds calculado a la salida del conducto central.

Conducto central $Re_x \cdot 10^4$
0.40

A continuación se presenta en la Tabla 4.1.2 una revisión comparativa entre los valores del número de Reynolds del presente estudio con otros que han sido reportados con anterioridad por diversos investigadores, mismos que fueron calculados en un chorro *libre* plano turbulento. Como se puede observar en esta misma tabla, el valor del número de Reynolds más cercano al presente trabajo corresponde al de Mattingly y Criminale (1971) [104], quienes en su trabajo reportaron, de igual manera, tanto los perfiles de velocidades medias como las fluctuaciones de velocidad, entre otras cosas. Así, a partir de estos resultados se encuentra una similitud favorable con los obtenidos en el presente estudio.

Tabla 4.1.2

Revisión comparativa de los valores del número de Reynolds del presente trabajo con otros que han sido reportados con anterioridad por diversos investigadores, referentes a un chorro *libre* plano turbulento.

Investigador(es)	$Re_x \cdot 10^4$
Miller y Comings (1957) [107]	1.78
Van der Hegge Zijnen (1958) [108]	1.33
Knystautas (1964) [109]	4.10
Gunnar (1965) [103]	3.40
Bradbury (1965) [110]	3.00
Heskestad (1965) [111]	3.40
Flora y Goldschmidt (1969) [66]	1.71 a 2.55
Mattingly y Criminale (1971) [104]	0.10 a 0.60
Mih y Hoopes (1972) [105]	1.77 a 3.14
Goldschmidt y Bradshaw (1973) [67]	2.60
Gutmark y Wygnanski (1976) [106]	3.00
<i>Presente investigación (2003)</i>	<i>0.08 a 0.50</i>

TRABAJO CON
VALOR DE ORO

En resumen, se validó el equipo diseñado mediante la comparación entre los perfiles de velocidad media, así como fluctuante, tanto en forma teórica como experimental, de los cuales el rango de los valores del número de Reynolds fue de 0.08 a 0.50. Aunado a esto, se hizo una revisión comparativa entre los valores del número de Reynolds del presente trabajo con otros que han sido reportados con anterioridad por diversos investigadores referentes a un chorro *libre* plano turbulento, con el objeto de mostrar el buen funcionamiento del equipo diseñado, encontrándose que éste es confiable para la realización del estudio sobre el mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo, para diferentes T , utilizando la técnica de HWA.

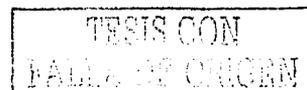
Con base en lo anterior, se discuten los resultados obtenidos para las siguientes posiciones medidas: \bar{u} de salida, \bar{u} a 8H, \bar{u} a 16H y \bar{u} a 24H, mostrados en las Figuras 4.1.3 a 4.1.6. Por tanto, los resultados obtenidos son los siguientes: para la posición de salida se observa un perfil casi plano; esto se debe básicamente a la característica física que presenta un flujo turbulento desarrollado en un conducto rectangular. Al incrementarse la distancia a 8H, el chorro se desarrolla perdiendo esta característica y para distancias mayores a 16H alcanza la condición de semejanza. Asimismo, en cuanto a las fluctuaciones de velocidad u'_{rms} , a la salida es notorio observar el bajo nivel de turbulencia que ahí existe; sin embargo, en la posición de 8H el pronto desarrollo del chorro genera cambios bruscos en sus fluctuaciones de velocidad y, sobre todo, a partir de la posición de 16H.

En particular, se observa que para las distancias tanto de 16H como de 24H los perfiles son casi idénticos, presentando mínimas fluctuaciones de velocidad en la parte central del perfil y casi nulas en las fronteras del chorro.

4.2 Perfiles de velocidades medias y fluctuantes de las diferentes tasas de velocidad media

Hasta ahora se han hecho pruebas de aceptación y validación tanto del equipo diseñado como del anemómetro de hilo caliente. Asimismo, se realizó una revisión comparativa entre los perfiles de velocidad media y fluctuante, así como en forma teórica y experimental, de los cuales el rango de los valores del número de Reynolds fue de 0.08 a 0.50. Sin embargo, no se ha entrado propiamente en materia del trabajo de investigación, que es mostrar los resultados experimentales de los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$ para las siguientes T : $T = 1$, $T = 0.25$, $T = 0.5$, $T = 2$ y $T = 4$.

Por ello, el resto de la tesis trata de las aportaciones hechas al mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo, sin introducir algún tipo de excitación –perturbación– externa.



Por tanto, en esta sección, así como en las siguientes, se mostrarán los resultados antes mencionados; además, se estudiará el comportamiento que presenta la variación del semiancho del chorro como función de la dirección principal del flujo y, por último, se analizará el efecto de la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro, también, como función de la dirección principal del flujo, tal y como se muestra en las Secciones 4.3 y 4.4, respectivamente.

Asimismo, la Tabla 4.2.1 incluye, en general, los valores del número de Reynolds de todas las T calculados a una distancia en x de 1 mm de la zona de salida de cada uno de los tres conductos del equipo diseñado, mismos que se reportan en órdenes de magnitud de 10^4 .

Tabla 4.2.1

Valores del número de Reynolds de todas las T calculados a una distancia en x de 1 mm de la zona de salida de cada uno de los tres conductos del equipo diseñado.

Valores de T	Conducto uno, $Re_1 \times 10^4$	Conducto dos, $Re_2 \times 10^4$	Conducto tres, $Re_3 \times 10^4$
1	0.49	0.50	0.50
0.25	0.34	0.08	0.32
0.50	0.33	0.16	0.34
2	0.15	0.34	0.15
4	0.09	0.33	0.09

Los valores del número de Reynolds mostrados en la Tabla 4.2.1 se muestran con el objeto de presentar tanto un panorama global de los mismos, así como de aportar nuevos resultados a la literatura especializada en el tema a partir de este trabajo experimental, a la vez que permitan tener un mejor entendimiento sobre el mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo, en virtud de que forma parte indisoluble de la cuestión ingenieril, más no se hace con la intención de compararlos, ya que dentro de la tendencia general de los chorros *libres* planos en coflujo, no se encontró ningún indicio de trabajo alguno semejante en la literatura.

Básicamente, las cinco T estudiadas se pueden clasificar en dos grupos: aquellas que presentan un mezclado lento de los tres chorros y las que se mezclan rápidamente. El primero lo constituyen las $T = 1$, $T = 0.25$ y $T = 0.5$ con velocidades medias altas en los conductos laterales y baja en el conducto central; es decir, $\bar{u}_2 > \bar{u}_1$, mientras que el segundo está compuesto de las $T = 2$ y $T = 4$ con velocidades medias bajas en los conductos laterales y alta en el conducto central; esto es, $\bar{u}_2 < \bar{u}_1$.

A continuación se presentan los resultados descriptivos de cada uno de los dos grupos obtenidos en esta investigación.

Dentro del primer grupo se puede señalar que el mezclado cambia de manera significativa con la distancia en la dirección del eje x , entre otros parámetros, tal y como se puede observar en las Figuras 4.2.1 a 4.2.4. Asimismo, en ellas se presentan los perfiles obtenidos tanto de velocidad media como de las u'_{rms} correspondientes a la $T = 1$. Para poder observar la influencia de la distancia en esta dirección, se muestra una secuencia de imágenes en donde el parámetro que cambia es la distancia; es decir, desde una $x = 1$ mm hasta una $x = 36$ cm. Es así que en la Figura 4.2.1 se pueden observar perfectamente delineados los tres perfiles típicos que definen a los flujos desarrollados en conductos planos turbulentos para la posición de salida, notándose las discontinuidades causadas por el espesor del acrílico de las dos placas internas. A medida que aumenta la distancia a $8H$ se va perdiendo esta tendencia, ocasionando que los tres chorros empiecen a mezclarse. No obstante, a esta distancia aún se notan los picos provenientes de los tres chorros.

Sin embargo, a una distancia de $16H$, Figura 4.2.2, los picos prácticamente se han perdido, mostrando una zona plana en el centro del perfil y, sobre todo, conforme aumenta la distancia, el mezclado hace que se tengan perfiles más continuos, que tienden a grandes distancias; es decir, de $24H$ al de un solo chorro, por lo que a partir de esta distancia el perfil del chorro ya no cambia, lo que indica que se ha alcanzado su desarrollo; es decir, que a partir de la posición de $24H$ los perfiles cumplen la condición de semejanza. Además, se nota la forma Gaussiana típica de los chorros turbulentos en conflujo. Es conveniente subrayar que en esta T se tiene un mezclado rápido de los tres chorros, desde la distancia de $16H$, en comparación con las $T = 0.25$ y $T = 0.5$ y lento con respecto a las $T = 2$ y $T = 4$.

De la Figura 4.2.3 se observa que en la salida de los chorros se tiene una máxima fluctuación de velocidad u'_{rms} entre las capas de cortante de los chorros y el fluido de baja velocidad media del medio ambiente, así como las burbujas de recirculación localizadas en las placas intermedias del acrílico; mientras que para una corriente abajo de $8H$, cuando está por iniciarse el mezclado, se puede observar una región casi plana en el centro del perfil, lo que indica un retardo del mezclado de los tres chorros. Sin embargo, se tiene un perfil más estable con menos fluctuaciones de velocidad.

De este modo, para las posiciones de $16H$ y $24H$, Figura 4.2.4, cuando los perfiles ya han alcanzado su desarrollo, se observan valores bajos de fluctuaciones de velocidad en la región central del perfil y en las fronteras del chorro, adquiriendo un valor máximo en las capas de cortante entre el chorro desarrollado y el fluido de baja velocidad media del ambiente; lo que señala una T con mínimas fluctuaciones de velocidad.

En tanto, en la $T = 0.25$, se siguen observando, de igual modo, en la posición de salida, como se muestra en la Figura 4.2.5 los perfiles característicos de los tres flujos desarrollados en conductos planos con sus notorias discontinuidades ocasionadas por el espesor de las dos placas internas, ya mencionadas.

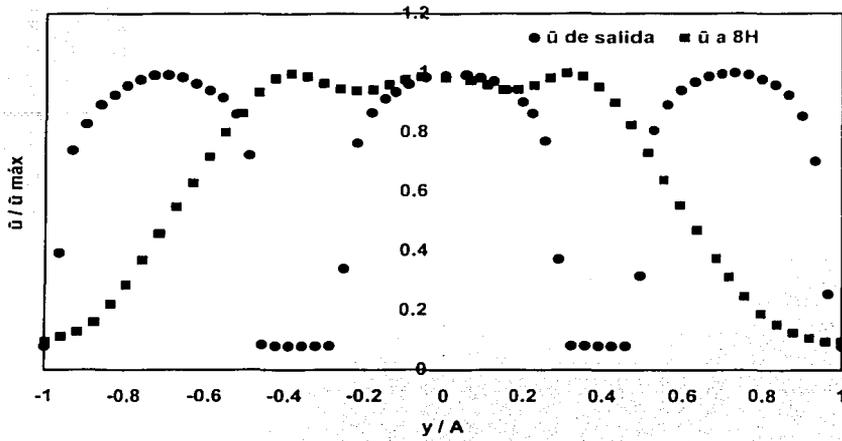


Figura 4.2.1
Perfiles de velocidad media-Tasa 1:1.

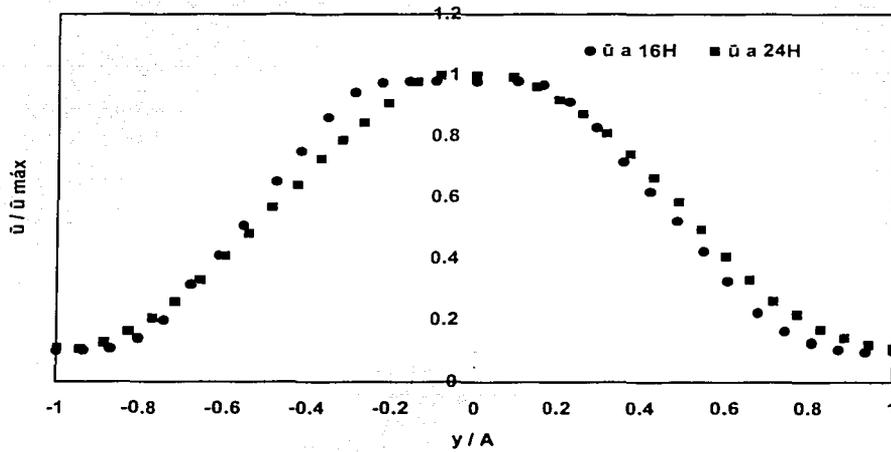


Figura 4.2.2
Perfiles de velocidad media-Tasa 1:1.

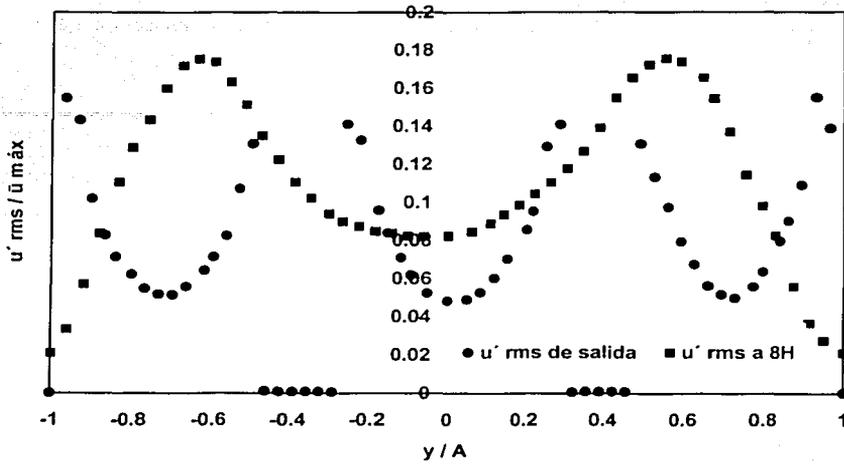


Figura 4.2.3
Perfiles u'_{rms} -Tasa 1:1.

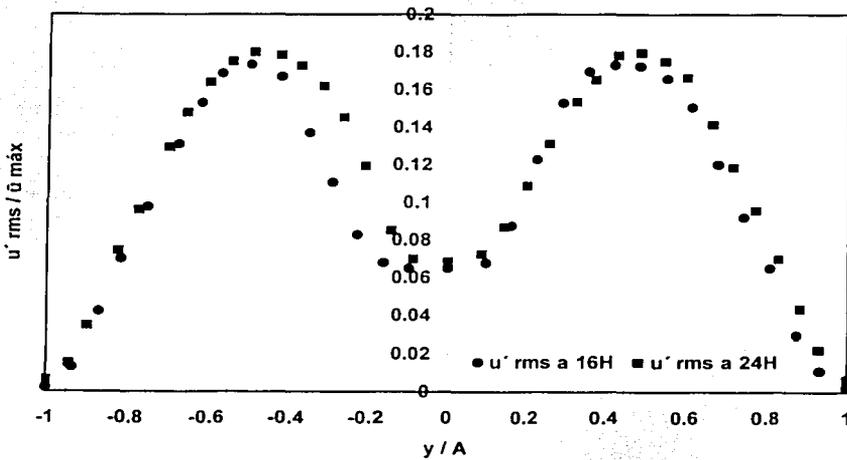
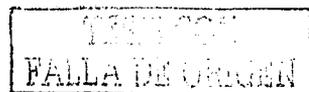


Figura 4.2.4
Perfiles u'_{rms} -Tasa 1:1.



Así, en la misma figura se puede observar que para una distancia de $8H$, el perfil predice un mezclado más lento entre los tres chorros en comparación con la $T = 1$, lo que señala un mezclado menos eficiente, debido a que la velocidad media de aire en el conducto central, todavía manifiesta su valor bajo de velocidad media en la zona central del perfil.

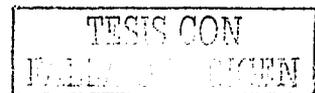
De la misma forma, en la posición de $16H$, Figura 4.2.6, se continúan viendo los dos picos, lo que manifiesta que los chorros no han alcanzado todavía la condición de semejanza o el mezclado aún no termina. Finalmente, hasta una distancia de $24H$ el chorro está completamente desarrollado, por lo que no se propone como una T idónea con mezclado rápido.

En relación con la u'_{rms} de salida, misma que aparece en la Figura 4.2.7, se puede observar que se continúa con la tendencia de tener máximas fluctuaciones de velocidad entre las capas de cortante de los chorros y el fluido de baja velocidad media en el ambiente, así como el localizado en las placas intermedias del acrílico. Asimismo, a esta distancia se nota una región plana en el centro del perfil, ocasionada por la baja turbulencia que se tiene a la salida de este conducto. Sin embargo, lo contrario sucede para una distancia de $8H$, en donde la turbulencia en el conducto central se ha incrementado considerablemente, debido a que los tres chorros ya se han empezado a mezclar.

Corriente abajo, a una distancia de $16H$, Figura 4.2.8, cuando los chorros están por cumplir la condición de semejanza, es notorio observar un ensanchamiento mayor en la región central del perfil, lo que señala mayores fluctuaciones de velocidad junto con un mezclado más prolongado, repercutiendo, de igual manera, para la posición de $24H$, en comparación con las que se tienen en la $T = 1$.

A su vez, el perfil de velocidad media en la posición de salida de la $T = 0.5$, Figura 4.2.9, también está definido bajo las mismas condiciones ya mencionadas. Sin embargo, a una distancia de $8H$, se nota un ligero aumento en la rapidez del mezclado en comparación con la $T = 0.25$; esto es, los picos se ubican a una distancia menor con respecto a su eje de simetría, esto se debe básicamente al incremento de velocidad media que se tiene en el conducto central.

Por consiguiente, los picos que se observan en la posición de $16H$, Figura 4.2.10, presentan un corrimiento hacia la región central del perfil, lo que da idea de un mezclado más rápido. De igual manera, sucede para la distancia de $24H$, en donde los perfiles cumplen nuevamente la condición de semejanza, observándose una vez más la forma Gaussiana típica de los chorros turbulentos desarrollados.



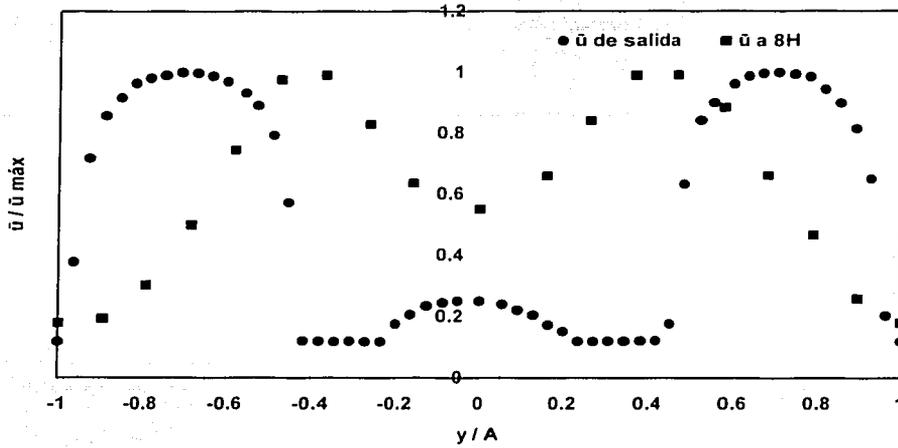


Figura 4.2.5
Perfiles de velocidad media—Tasa 0.25.

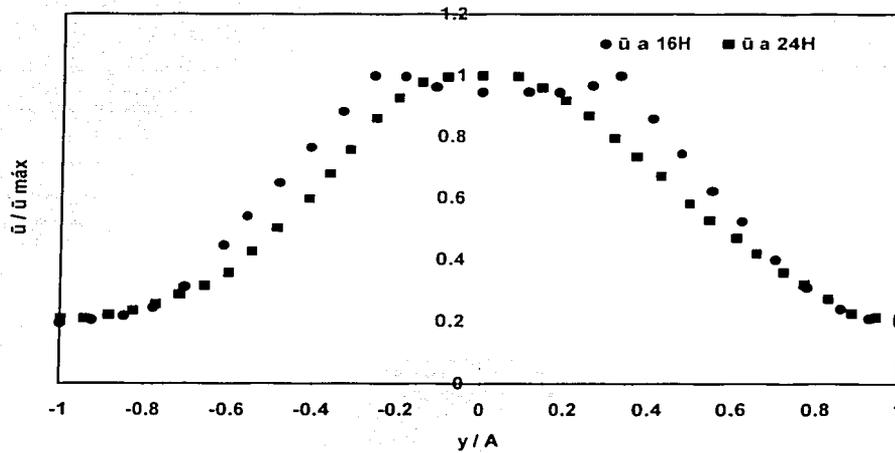
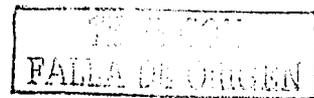


Figura 4.2.6
Perfiles de velocidad media—Tasa 0.25.



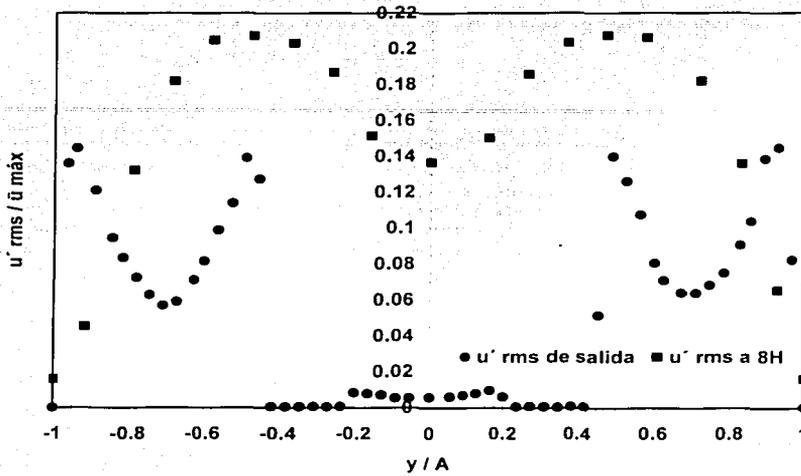


Figura 4.2.7
Perfiles u'_{rms} -Tasa 0.25.

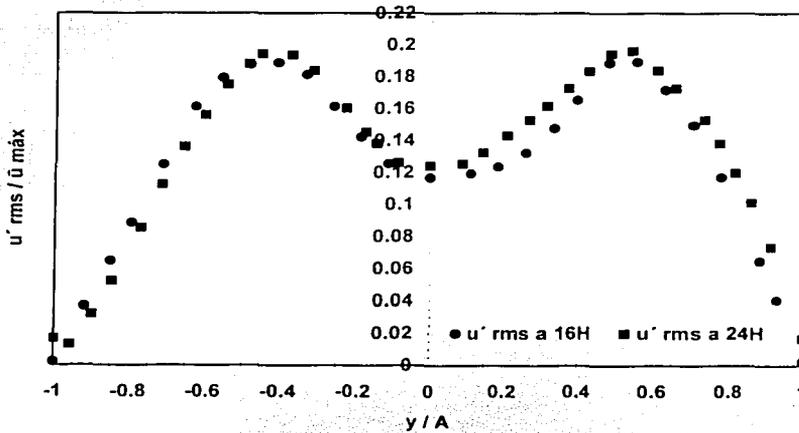


Figura 4.2.8
Perfiles u'_{rms} -Tasa 0.25.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Mediante estos resultados se puede percibir el efecto que tiene el aumento de la velocidad media en el conducto central sobre las fluctuaciones de velocidad de esta T, tal y como se indica en la Figura 4.2.11 y, al mismo tiempo, se corrobora que el perfil fluctuante en la posición de salida sigue la misma tendencia de las dos T anteriores. Es así que el único cambio que existe es el incremento turbulento que se ve en el conducto central, además que desaparece la zona plana en el centro del perfil, la cual se observa en el conducto central de la $T = 0.25$. En efecto, esta pérdida de planicie da lugar a un inicio más temprano del mezclado de los tres chorros. En consecuencia, para una distancia de $8H$ se reducen las fluctuaciones de velocidad y asimismo, continúa desarrollándose el mezclado de los chorros dado por el pequeño aumento de la velocidad media en el conducto central.

De modo que, para la posición de $16H$, las fluctuaciones de velocidad continúan disminuyendo ligeramente, de tal manera que a partir de la distancia de $24H$ los perfiles manifiestan su desarrollo total y con ello se observa una reducción de la zona plana localizada en el centro del perfil. Esta tendencia es la opuesta al caso de la $T = 0.25$ donde la región central del perfil aumenta, indicando menos turbulencia junto con una mayor rapidez de mezclado.

En cuanto al segundo grupo, existen diferencias significativas en comparación al primero, a excepción de las condiciones de salida que continúan manteniendo esta tendencia. La principal diferencia radica en que los chorros se mezclan con mayor rapidez, lo cual repercute en las fluctuaciones de velocidad, mismas que afectan la estabilidad del flujo.

Por tanto, si se desea tener un mezclado rápido de los tres chorros, se puede escoger este grupo, debido a que los perfiles de velocidad media de ambas T alcanzan el desarrollo a partir de la posición de $8H$, tal y como se muestra en las Figuras 4.2.13 y 4.2.17. Aunado a esto, se puede agregar que a esta misma distancia, los perfiles pierden por completo la visibilidad de los picos provenientes de los tres chorros, lo que señala que el mezclado ha concluido cumpliéndose la condición de semejanza a una distancia mucho menor en la dirección del eje x .

Cabe destacar, que la $T = 4$ representa el mezclado más rápido que se tiene dentro de las cinco T, en virtud de que tiene los valores de velocidades medias más bajos en los conductos laterales y alto en el conducto central, ocasionando que el chorro central absorba casi al instante a los dos chorros laterales, comportándose así como un solo chorro.

Asimismo, los perfiles para las distancias de $16H$ y $24H$ de las $T = 2$ y $T = 4$, respectivamente, Figuras 4.2.14 y 4.2.18, indican que los chorros alcanzan su desarrollo total. En particular, la $T = 2$ presenta un mezclado completamente homogéneo, efecto que no se ve en ninguna otra T a estas mismas distancias. Por su parte, la $T = 4$ señala un mezclado semejante a las T del primer grupo, a excepción del pronto desarrollo, lo cual se debe al valor alto de velocidad media que se tiene en el conducto central y demasiado bajo en los conductos laterales.

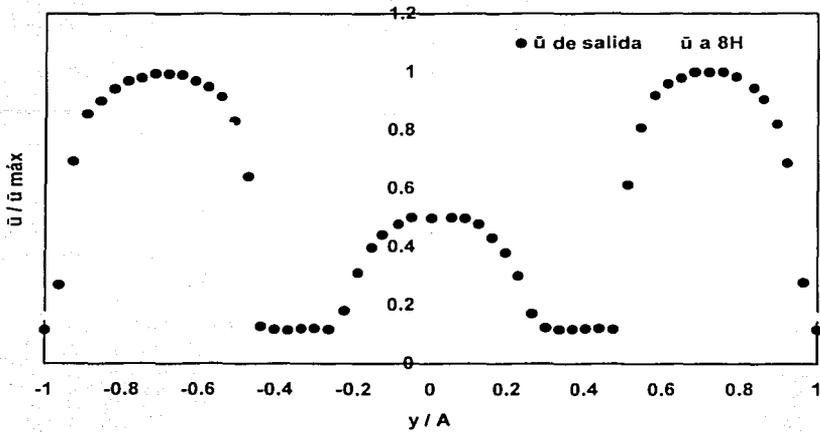


Figura 4.2.9
Perfiles de velocidad media-Tasa 0.5.

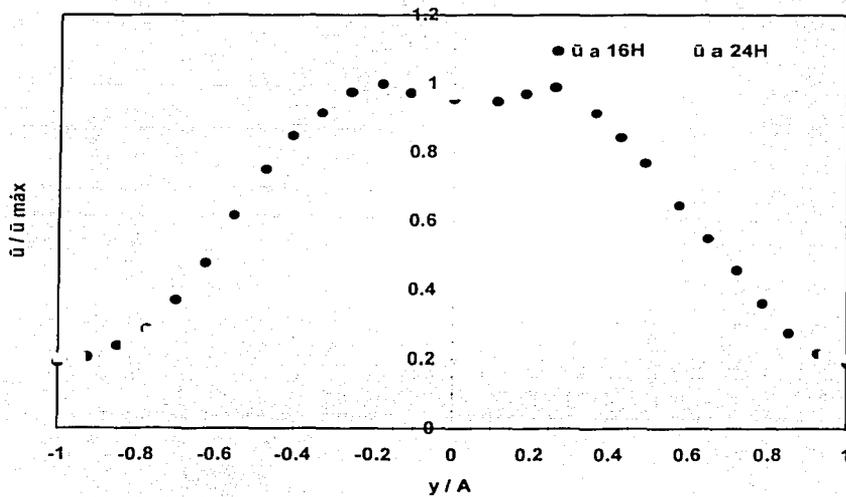


Figura 4.2.10
Perfiles de velocidad media-Tasa 0.5.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

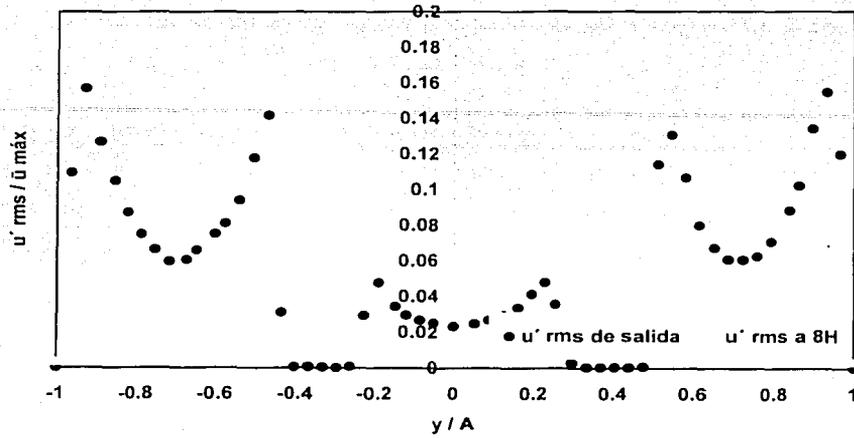


Figura 4.2.11
Perfiles u'_{rms} -Tasa 0.5.

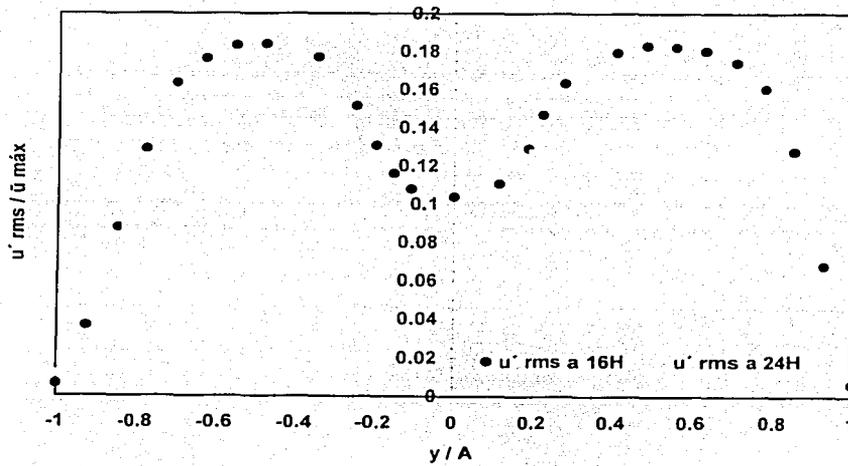


Figura 4.2.12
Perfiles u'_{rms} -Tasa 0.5.

TESIS CON
FALLA EN ORIGEN

En resumen, la $T = 2$ es la única T que resalta por tener el mezclado más homogéneo, tal vez, su mezclado no es tan rápido como lo es el de la $T = 4$, en la cual los chorros se comportan como si fueran uno solo, tal y como se puede ver en la Figura 4.2.17, pero, si mucho más rápido en comparación con las T del primer grupo. Por tal razón, ésta sería la T más eficiente dentro del mezclado de los tres chorros. En tanto, los perfiles en las posiciones de 16H y 24H, como se puede apreciar en la Figura 4.2.18, no se superponen cuando han alcanzado su desarrollo total, al igual que sucede en las demás T .

Adicionalmente, en las Figuras 4.2.15 y 4.2.19 de las $T = 2$ y $T = 4$, respectivamente, se pueden observar los perfiles fluctuantes para las posiciones de salida y de 8H. En la primera posición, ambos perfiles mantienen la misma tendencia de las T anteriores. No obstante, en la segunda posición, para ambos perfiles, existe un cambio brusco en la región central del perfil, lo que corresponde a un nivel más alto de turbulencia, de tal manera que estas fluctuaciones de velocidad parecen alcanzar la altura de los picos. Esto se debe, principalmente, a las bajas velocidades medias que se tienen en los conductos laterales y alta en el conducto central y como consecuencia de ello, el mezclado se hace particularmente intenso, generando mayores capas de cortante entre los chorros.

Aunado a esto, cabe destacar que los perfiles en las posiciones de 16H y 24H de la $T = 2$, tal y como se muestra en la Figura 4.2.16, observan un efecto significativo entre ambos, no presentado en ningún perfil u'_{rms} para estas mismas distancias, mismo que radica en que ambos perfiles no se superponen, como sí sucede en las demás T , pese a que se tiene conocimiento de que los chorros han alcanzado el desarrollo total a partir de estas posiciones y que, por tal motivo, cumplen la condición de semejanza.

Lo anterior puede indicar, tal vez, una desventaja en el mezclado, de tal manera que se necesite de una mayor distancia en el eje x , para que, quizá, los perfiles u'_{rms} se superpongan y de este modo esperar que el flujo se estabilice. Por tal razón, resultaría conveniente dar seguimiento a esta investigación, con el objeto de poder corroborar esto y saber si esta diferencia es favorable o desfavorable en el mezclado.

Finalmente, los perfiles observados en la Figura 4.2.20 no presentan grandes diferencias en comparación con los demás perfiles u'_{rms} a estas mismas distancias.

En resumen, hay que enfatizar que en este segundo grupo, a una distancia de 8H, no existen picos, lo que conduce a un mezclado demasiado rápido de los chorros junto con intensas fluctuaciones de velocidad. Por el contrario, las T del primer grupo, para esta misma posición, presentan picos bien definidos y con ello, un retardo del mezclado de los chorros, así como menores fluctuaciones de velocidad.

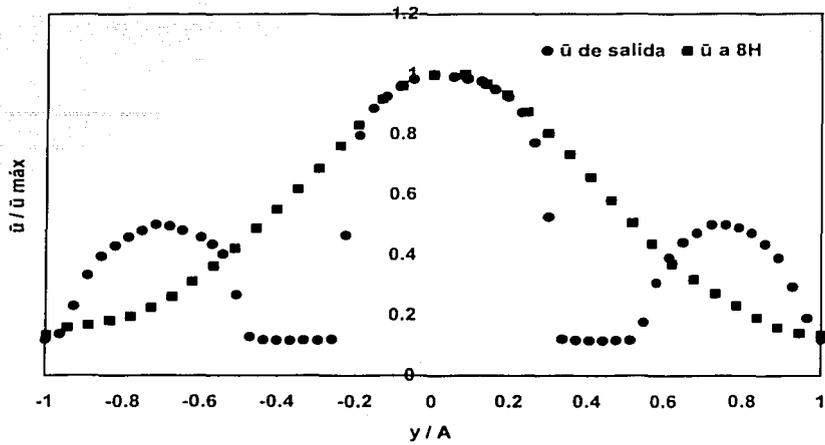


Figura 4.2.13
Perfiles de velocidad media-Tasa 2.

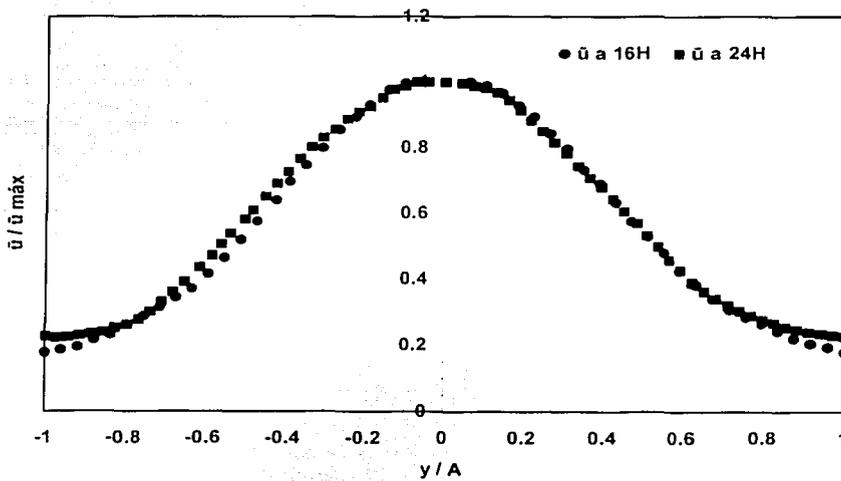


Figura 4.2.14
Perfiles de velocidad media-Tasa 2.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

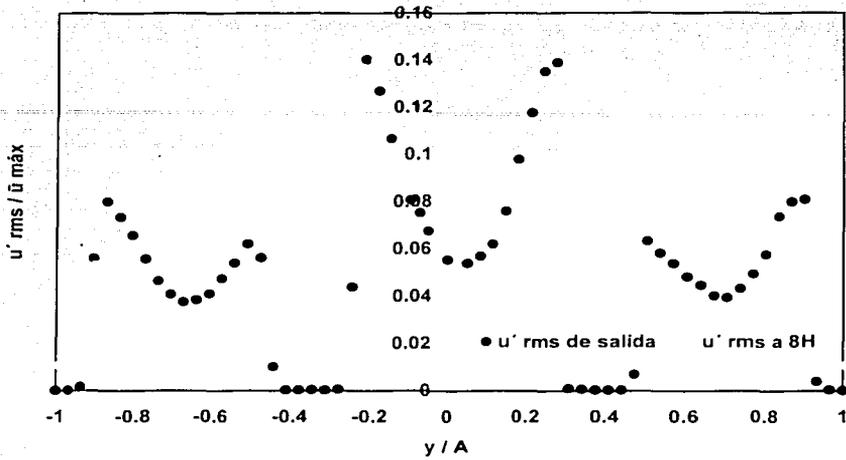


Figura 4.2.15
Perfiles u'_{rms} -Tasa 2.

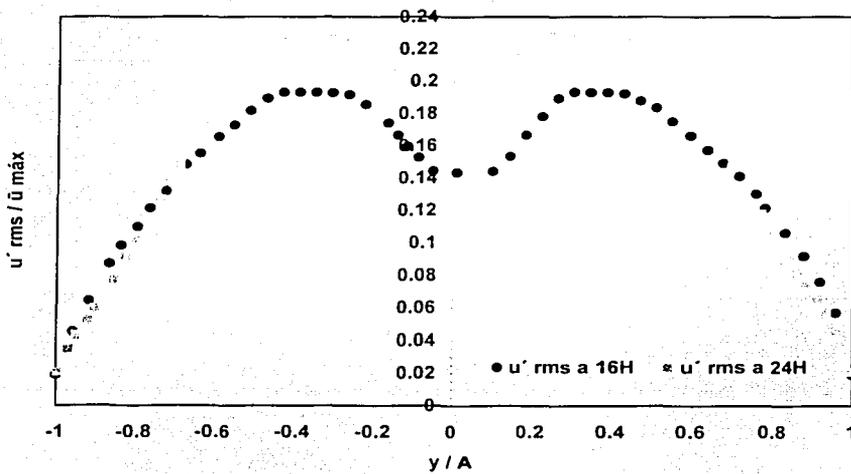


Figura 4.2.16
Perfiles u'_{rms} -Tasa 2.

TESIS CON
FALLA DE INGEN

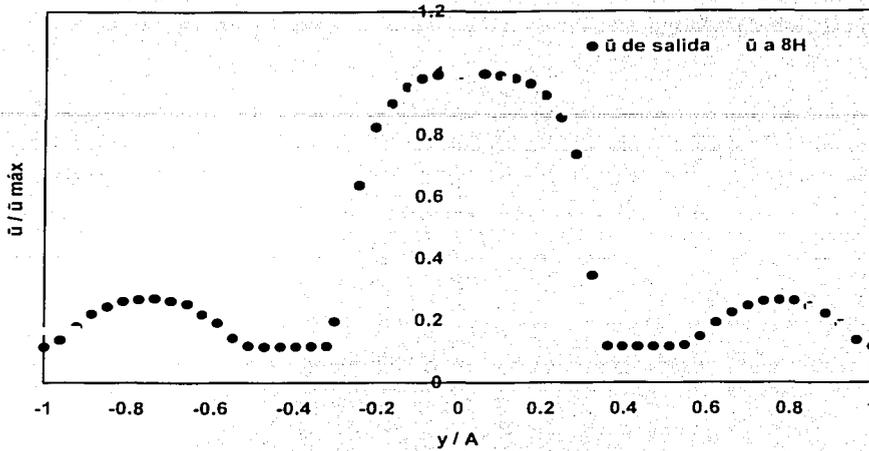


Figura 4.2.17
Perfiles de velocidad media-Tasa 4.

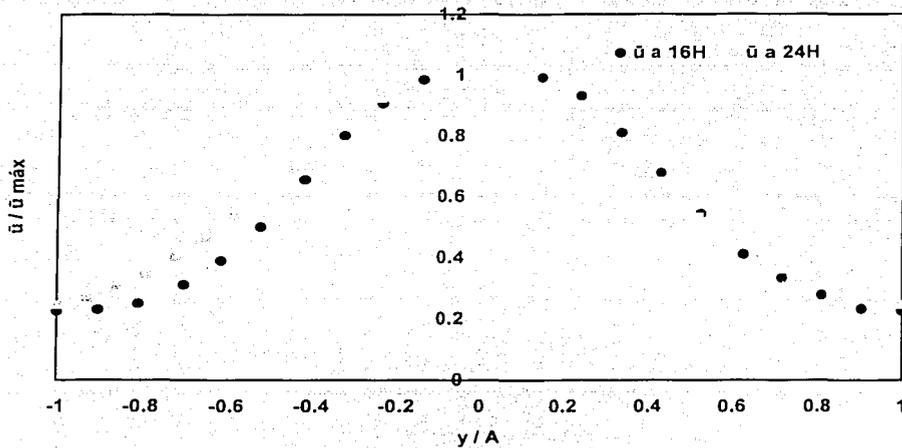


Figura 4.2.18
Perfiles de velocidad media-Tasa 4.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SE
DE LA BIBLIOTECA

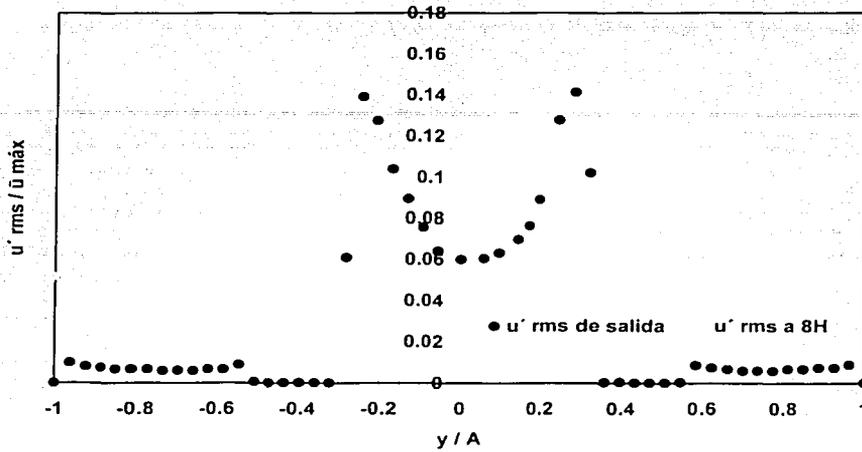


Figura 4.2.19
Perfiles u'_{rms} -Tasa 4.

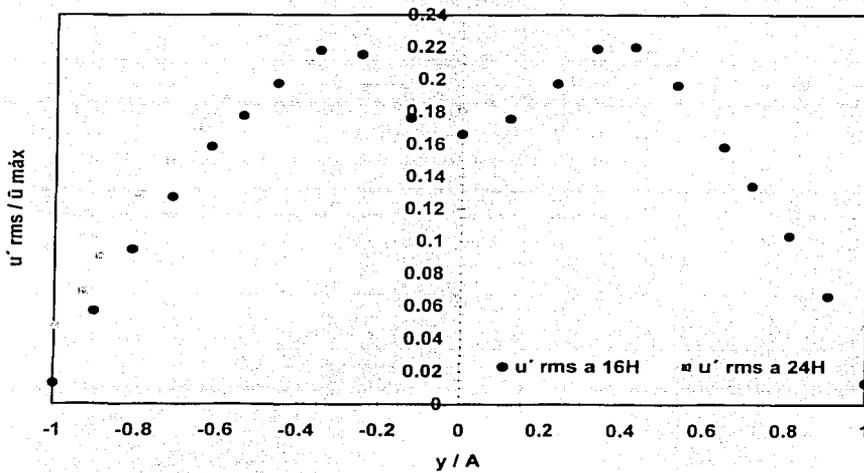


Figura 4.2.20
Perfiles u'_{rms} -Tasa 4.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3 Análisis del semiancho del chorro

En esta sección se muestran los resultados generales asociados al semiancho del chorro compuesto A, normalizado con el semiancho del chorro a la salida A_0 ; es decir, $\frac{A}{A_0}$, contra la distancia en la dirección del eje x normalizada también con el semiancho del chorro a la salida A_0 ; esto es, $\frac{x}{A_0}$, para todas las T , así como para un solo chorro –el central–. En particular, este último se normaliza con el semiancho de un solo conducto H_2 , tal y como se puede apreciar en la Figura 4.1.

Es así que los perfiles obtenidos, incluidos en la Figura 4.3.1, señalan que la $T = 1$ tiene el mayor valor de ensanchamiento, le sigue en rapidez de ensanchamiento la $T = 0.5$ y, posteriormente, la correspondiente $T = 0.25$. Este orden indica que las T de menor rapidez de mezclado son las que demuestran tener el mayor valor de ensanchamiento en la dirección transversal al flujo principal. Por consiguiente, las T que muestran mayor rapidez de mezclado son las que tienen el valor de ensanchamiento más bajo, lo que señala que estas T alcanzan su desarrollo total a distancias mucho menores que las tres T anteriores, razón por la que no se abre mucho el chorro.

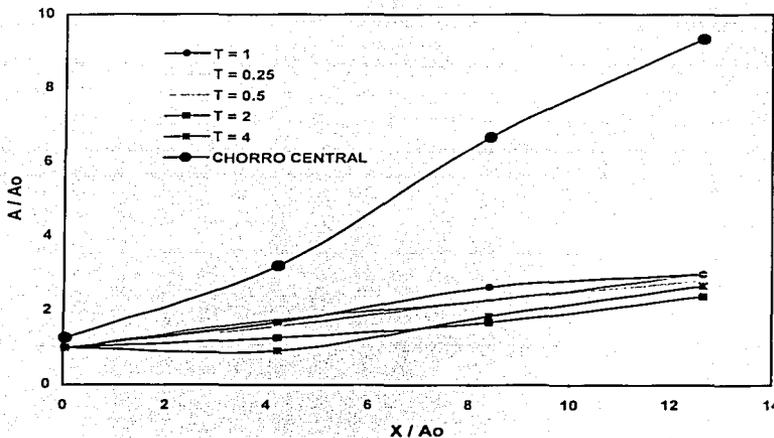


Figura 4.3.1

Variación del semiancho del chorro para las diferentes T y para un solo chorro solo –el central–.

Asimismo, se puede notar que la diferencia de velocidades medias entre los tres conductos trae por consecuencia una reducción en el ensanchamiento del chorro compuesto, acentuándose esta tendencia, como ya se mencionó, para las T con mayor velocidad media en el centro, como son las $T = 4$ y $T = 2$. En el caso del chorro central, únicamente es notorio observar el incremento del valor relativo del ensanchamiento, por lo que se debe tener presente que en éste último se tomó para su normalización el semiancho de un solo conducto $\frac{H}{2}$, de tal manera que parece que éste es mayor que el semiancho del chorro compuesto, pero no lo es tanto como aparenta.

4.4 Efecto de la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro

De igual manera, con el objeto de tener un mejor entendimiento y comprensión del mezclado que se tiene entre los tres chorros, se incluye otro parámetro de comparación entre las diferentes T estudiadas: la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro como función de la dirección del eje x . En este sentido, la Figura 4.4.1 muestra los perfiles de la velocidad media máxima central del chorro \bar{u}_{central} , normalizados con la velocidad media de salida \bar{u}_{salida} , es decir, $\frac{U_{\text{central}}}{U_{\text{salida}}}$ contra $\frac{x}{A_0}$.

En donde la velocidad media de salida del chorro se define como la velocidad media medida a una distancia de 1 mm de separación en la dirección del eje x , a partir de la salida del conducto central \bar{u}_1 .

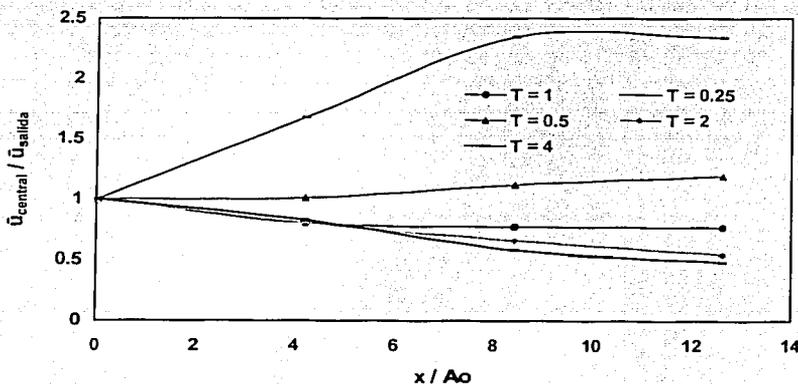
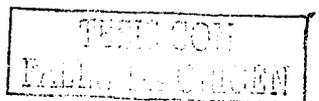


Figura 4.4.1

Evolución de la velocidad media máxima de las diferentes T .



De esta forma, con base en los resultados anteriores, se tiene que para las $T = 0.25$ y $T = 0.5$, la velocidad media central es mayor que la de salida para toda x , ya que los chorros laterales, de alta velocidad media, le transmiten cantidad de movimiento al central y, por tanto, lo contrario ocurre para las $T = 1$, $T = 2$ y $T = 4$.

A partir de estos resultados, se puede afirmar que los logros alcanzados en cada una de las secciones del presente trabajo de investigación, reflejan el cumplimiento de los objetivos fijados al inicio del mismo, así como su significativa contribución al desarrollo del estudio de mezclado de tres chorros *libres* planos en conflujo, de acuerdo a sus alcances y limitaciones en función de sus objetivos planteados al inicio del mismo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

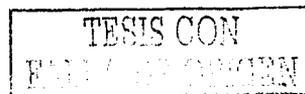
5.1 Conclusiones

La aerodinámica de chorros *libres* planos en coflujo ha sido ampliamente estudiada por un número considerable de investigadores, por lo que resultó importante tener un panorama amplio y general en el tema y poder situar así este trabajo. De ahí, la importancia de realizar una revisión bibliográfica exhaustiva. Actualmente, cabe señalar que entre los trabajos que se han realizado sobre el tema en estudio, destacan únicamente trabajos referentes con un solo chorro; es decir, un chorro *libre* plano turbulento, así como los relacionados al análisis del proceso de mezclado de dos chorros *libres* planos en coflujo.

A decir de los procesos de mezclado, en general, son de relevancia fundamental en muchas de las aplicaciones de ingeniería a la hora de diseñar los equipos, de tal manera que éstos determinan los perfiles de flujos en chorros, estelas y, en particular, gobiernan el campo del flujo en control de flamas en cámaras de combustión, en ciertos tipos de atomizadores y en reactores cuyo tamaño o eficiencia dependerá de la tasa de velocidad media de mezclado. De igual manera, se les atribuye el ruido asociado a chorros de propulsión, los cuales han sido ampliamente investigados por Liu, Alper y Mankbudi (1978) [7], Moore (1978) [8] y Ffowcs y Kempton (1978) [9], entre otros.

Es importante resaltar que existen fenómenos donde sí es conveniente que existan fluctuaciones de velocidad, como es el caso de un quemador, en el que éstas se aprovechan para obtener un mejor mezclado del combustible con el comburente, entre otros muchos más fenómenos.

Por otra parte, en síntesis, los resultados de la extensa investigación bibliográfica mostraron que existe una abundante bibliografía referente al tema de chorros *libres* planos bidimensionales en coflujo tales como: Liepman y Laufer (1947) [40], Sunyach y Mathieu (1969) [41], Patel (1970) [42], Bradbury (1965) [43], Wygnanski y Fiedler (1970) [44], así como Peerless (1971) [45]), por citar sólo algunas referencias. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con respecto al estudio de tres chorros *libres* planos en coflujo, ha habido pocos estudios, en comparación con la gran cantidad de trabajos que se han llevado a cabo con dos chorros *libres* planos, lo cual conforme se pudo constatar en la literatura especializada en el tema, entre ellos destacan los siguientes: Manero (1989) [1], Durst y Zaré (1975) [2], Milojevic (1986) [3], Mendoza (1996) [4], en cuanto a trabajos experimentales, y Ávila (1993) [5], enfocado a trabajo numérico.



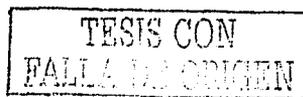
Lo anterior indicó que, la totalidad de la literatura sólo ha estudiado cuatro trabajos experimentales referentes a tres chorros *confinados* planos en coflujo y tan sólo existe un caso *numérico* referido. Si es así, el proceso de mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo no ha sido estudiado, hasta donde se sabe. Por tal razón, fue imposible poder realizar comparaciones entre los resultados obtenidos del presente trabajo y lo escrito en la literatura. Por ello, se concluyó que este estudio requiere de mayor investigación tanto experimental como teórica, así como de una estrecha relación entre ambas actividades. En conclusión, este análisis realizado tuvo el mérito de ser un trabajo de investigación, que viene a completar un espacio vacío dentro de la literatura.

En general, en la mecánica de fluidos, de acuerdo con la literatura, junto con la revisión realizada en el presente estudio, se observó que los flujos más analizados pertenecen a chorros planos y estelas en coflujo, capa de mezclado entre dos chorros planos turbulentos, chorro plano turbulento con calentamiento, capa de mezclado con reacción química turbulenta, capa de mezclado entre dos chorros planos con excitación acústica, chorros axisimétricos en coflujo, así como chorros en coflujo giratorios y, en particular, no se encontró nada reportado sobre el mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo para diferentes T , utilizando la técnica de HWA.

En tanto, en el presente trabajo se estudió el mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo para cinco T , definidas de la forma: $T \equiv \frac{u_1}{u_2}$, utilizando la técnica de HWA, para obtener los resultados experimentales tales como: los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$, así como para un chorro *libre* plano —sólo el central—, el comportamiento que presenta la variación del semiancho del chorro, la evolución de la velocidad media máxima en el centro del chorro, ambas como función de la dirección principal del flujo y , finalmente, la comparación de los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$, obtenidos en este estudio, de un solo chorro *libre* plano contra las predicciones teóricas reportadas en la literatura.

Para ello, se tuvo que diseñar y construir un equipo experimental que pudiera caracterizar perfectamente el mezclado de los tres chorros, de tal manera que fue posible obtener tanto las magnitudes de las velocidades medias que definieron a cada T como fluctuantes, mismas que se tenían en cada uno de los conductos. A su vez, tanto los campos de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ como fluctuante $u'(x, y)$ se midieron inmediatamente a la salida de los conductos; es decir, a una \bar{u} de salida en $x = 1$ mm, así como a distancias de $8H$ en $x = 12$ cm, $16H$ en $x = 24$ cm y $24H$ en $x = 36$ cm veces el ancho H de un solo conducto.

Cabe mencionar que toda la experimentación se realizó de acuerdo con la metodología descrita en el Capítulo 3, Sección 3.4 y en las siguientes condiciones experimentales:



1. La velocidad media proveniente del turbosoplador se reguló mediante tres válvulas tipo mariposa de dos pulgadas de diámetro de hierro modular cromado controladas manualmente.
2. Se empleó aire comprimido como fluido manométrico a una temperatura promedio de 20.3° C para calibrar la sonda de hilo caliente, existiendo una variación máxima de 1.5° C entre cada uno de los dos rangos de calibración previamente señalados.
3. La presión atmosférica que se tuvo en el laboratorio fue de 78,000 Pa.
4. La densidad del aire promedio utilizada como fluido de trabajo fue de 0.93 $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Asimismo, se emplearon dos rangos de calibración en la medición de las T, así el rango de los valores obtenidos del número de Reynolds fue de 0.14 a 0.40.

Con base en lo anterior, se obtuvieron los resultados que permitieron comprender los efectos que produjeron las diversas T sobre tres chorros *libres* planos en conflujo. Por tanto, a continuación se mencionan cada uno de los resultados obtenidos conforme a los objetivos planteados al inicio del estudio, y se desglosan las principales conclusiones de los objetivos referidos:

Básicamente, las cinco T estudiadas se pudieron clasificar en dos grupos: aquellas que presentaron un mezclado lento de los tres chorros y las que se mezclan rápidamente. El primero lo constituyeron las T = 1, T = 0.25 y T = 0.5 con velocidades medias altas en los conductos laterales y baja en el conducto central; es decir, $\bar{u}_2 > \bar{u}_1$, mientras que el segundo estuvo compuesto de las T = 2 y T = 4 con velocidades medias bajas en los conductos laterales y alta en el conducto central; esto es, $\bar{u}_2 < \bar{u}_1$.

En general, se observó que el mezclado cambió de manera significativa con la distancia en la dirección del eje x, entre otros parámetros. Inicialmente, en la T = 1 se observaron perfectamente delineados los tres perfiles típicos que definen a los flujos desarrollados en conductos planos turbulentos para la posición de salida, notándose las discontinuidades causadas por el espesor del acrílico de las dos placas internas. A medida que aumentó la distancia a 8H se fue perdiendo esta tendencia, ocasionando que los tres chorros empezaran a mezclarse. No obstante, a esta distancia aún se notaban los picos provenientes de los tres chorros.

Sin embargo, a una distancia de $16H$, los picos prácticamente se habían perdido, mostrando una zona central plana en el centro del perfil y, sobre todo, conforme aumentaba la distancia el mezclado ocasionó que se tuvieran perfiles más continuos, los cuales tendían a grandes distancias; es decir, de $24H$, a perecerse al de un solo chorro, por lo que a partir de esta distancia el perfil del chorro ya no cambió, lo que indicó que se había alcanzado su desarrollo; es decir, que a partir de la posición de $24H$ los perfiles cumplieron la condición de semejanza. Además, se notó la forma Gaussiana típica de los chorros turbulentos en coflujo.

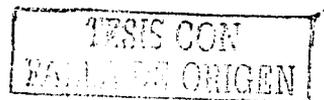
Es conveniente subrayar que en esta T se tuvo un mezclado rápido de los tres chorros, desde la distancia de $16H$, en comparación con las $T = 0.25$ y $T = 0.5$ y lento con respecto a las $T = 2$ y $T = 4$.

Adicionalmente, en la salida de los chorros se tuvo una máxima fluctuación de velocidad u'_{rms} entre las capas de cortante de los chorros y el fluido de baja velocidad media del ambiente, así como las burbujas de recirculación localizadas en las placas intermedias del acrílico; mientras que para una corriente abajo de $8H$, cuando se había iniciado el mezclado, se pudo observar una región casi plana en el centro del perfil, lo que indicó un retardo del mezclado de los tres chorros. Sin embargo, se tuvo un perfil más estable con menos fluctuaciones de velocidad. De este modo, para las posiciones de $16H$ y $24H$, cuando los perfiles ya habían alcanzado su desarrollo, se observaron valores bajos de fluctuaciones de velocidad en la región central del perfil y en las fronteras del chorro, adquiriendo un valor máximo en las capas de cortante entre el chorro desarrollado y el fluido de baja velocidad media del ambiente, lo que señaló una T con mínimas fluctuaciones de velocidad.

En tanto, en la $T = 0.25$, se siguieron observando, de igual modo, en la posición de salida, los perfiles característicos de los tres flujos desarrollados en conductos planos con sus notorias discontinuidades ocasionadas por el espesor de las dos placas internas, ya mencionadas. Así, se pudo observar que para una distancia de $8H$, el perfil predijo un mezclado más lento entre los tres chorros en comparación con la $T = 1$, lo que señaló un mezclado menos eficiente, debido a que la velocidad media de aire en el conducto central, todavía manifestaba su valor bajo de velocidad media en la zona central del perfil.

Asimismo, en la posición de $16H$, se continuaron viendo los dos picos, lo que manifestó que los chorros no habían alcanzado todavía la condición de semejanza o el mezclado aún no terminaba. Finalmente, hasta una distancia de $24H$ el chorro estaba completamente desarrollado, por lo que no se propuso como T idónea con mezclado rápido.

De esta T , para la u'_{rms} de salida, se pudo observar que se continuaba con la tendencia de tener máximas fluctuaciones de velocidad entre las capas de cortante de los chorros y el fluido de baja velocidad media en el medio ambiente, así como el localizado en las placas intermedias del acrílico.



Asimismo, a esta distancia se notó una región plana en el centro del perfil, ocasionada por la baja turbulencia que se tenía a la salida de este conducto. Sin embargo, lo contrario sucedió para una distancia de 8H, en donde la turbulencia en el conducto central se había incrementado considerablemente, debido a que los tres chorros ya se habían empezado a mezclar.

Corriente abajo, a una distancia de 16H, cuando los chorros estaban por cumplir la condición de semejanza, fue notorio observar un ensanchamiento mayor en la región central del perfil, lo que señaló mayores fluctuaciones de velocidad junto con un mezclado más prolongado, repercutiendo, de igual manera, para la posición de 24H, en comparación con las que se tenían en la $T = 1$.

A su vez, el perfil de velocidad media en la posición de salida de la $T = 0.5$, también estuvo definido bajo las mismas condiciones ya mencionadas. Sin embargo, a una distancia de 8H, se notó un ligero aumento en la rapidez del mezclado en comparación con la $T = 0.25$; esto es, los picos se ubicaron a una distancia menor con respecto a su eje de simetría, esto se debió básicamente al incremento de velocidad media que se tenía en el conducto central.

Por consiguiente, los picos observados en la posición de 16H, presentaron un corrimiento hacia la región central del perfil, lo que dio idea de un mezclado más rápido. De igual manera, sucedió para la distancia de 24H y, finalmente, los perfiles cumplieron nuevamente la condición de semejanza, observándose una vez más la forma Gaussiana típica de los chorros turbulentos desarrollados.

Mediante estos resultados se pudo percibir el efecto que tuvo el aumento de la velocidad media en el conducto central sobre las fluctuaciones de velocidad de esta T y, al mismo tiempo, se corroboró que el perfil fluctuante en la posición de salida seguía la misma tendencia de las dos T anteriores. Es así que el único cambio que existió fue el incremento turbulento que se vio en el conducto central, además que desapareció la zona plana en el centro del perfil, la cual se observaba en el conducto central de la $T = 0.25$. En efecto, esta pérdida de planicie dio lugar a un inicio temprano del mezclado de los tres chorros. En consecuencia, para una distancia de 8H se redujeron las fluctuaciones de velocidad y asimismo, continuó desarrollándose el mezclado de los chorros dado por el pequeño aumento de la velocidad media en el conducto central.

De modo que, para la posición de 16H, las fluctuaciones de velocidad continuaron disminuyendo ligeramente, de tal manera que a partir de la distancia de 24H los perfiles manifestaron su desarrollo total y con ello se observó una reducción de la zona plana localizada en el centro del perfil. Esta tendencia fue la opuesta al caso de la $T = 0.25$ donde la región central del perfil aumentaba, indicando menos turbulencia junto con una mayor rapidez de mezclado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En cuanto al segundo grupo, existieron diferencias significativas en comparación al primero, a excepción de las condiciones de salida que continuaron manteniendo esta tendencia. La principal diferencia radicó en que los chorros se mezclaron con mayor rapidez, lo cual repercutió en las fluctuaciones de velocidad, mismas que afectaban la estabilidad del flujo.

Por tanto, si se deseaba tener un mezclado rápido de los tres chorros, se podía escoger este grupo, debido a que los perfiles de velocidad media de ambas T alcanzaban el desarrollo a partir de la posición de 8H. Aunado a esto, se pudo agregar que a esta misma distancia, los perfiles perdían por completo la visibilidad de los picos provenientes de los tres chorros; lo que señaló que el mezclado había concluido cumpliéndose la condición de semejanza a una distancia mucho menor en la dirección del eje x .

Cabe destacar, que la $T = 4$ representó el mezclado más rápido que se tuvo dentro de las cinco T, en virtud de que tenía los valores de velocidades medias más bajos en los conductos laterales y alto en el conducto central, ocasionando que este último absorbiera casi al instante a los dos chorros laterales, comportándose así como un solo chorro.

Asimismo, los perfiles para las distancias de 16H y 24H de las $T = 2$ y $T = 4$, respectivamente, indicaron que los chorros alcanzaban su desarrollo total. En particular, la $T = 2$ presentó un mezclado completamente homogéneo, efecto que no se vio en ninguna otra T a estas mismas distancias. Por su parte, la $T = 4$ señaló un mezclado semejante a las T del primer grupo, a excepción del pronto desarrollo, lo cual se debió al valor alto de velocidad media que se tenía en el conducto central y demasiado bajo en los conductos laterales.

En resumen, la $T = 2$ es la única T que resaltó por tener el mezclado más homogéneo, tal vez, su mezclado no fue tan rápido como el de la $T = 4$, en la cual los chorros se comportaban como si fueran uno solo, pero sí mucho más rápido en comparación con las T del primer grupo. Por tal razón, ésta fue la T más eficiente dentro del mezclado de tres chorros. En tanto, los perfiles en las posiciones de 16H y 24H no se superponían cuando habían alcanzado su desarrollo total, al igual que sucedió en las demás T.

Adicionalmente, en los perfiles fluctuantes para las posiciones de salida y de 8H de las $T = 2$ y $T = 4$, respectivamente, se pudo observar que en la primera posición, ambos perfiles mantuvieron la misma tendencia de las T anteriores. No obstante, en la segunda posición, para ambos perfiles, existió un cambio brusco en la región central del perfil, lo que correspondió a un nivel más alto de turbulencia, de tal manera que estas fluctuaciones de velocidad parecían alcanzar la altura de los picos. Esto se debió, principalmente, a las bajas velocidades medias que se tenían en los conductos laterales y alta en el conducto central y como consecuencia de ello, el mezclado se hizo particularmente intenso, generando mayores capas de cortante entre los chorros.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Aunado a esto, cabe destacar que los perfiles en las posiciones de 16H y 24H de la $T = 2$ observan un efecto significativo entre ambos, no presentado en ningún perfil u'_{rms} para estas mismas distancias, mismo que radicó en que ambos perfiles no se superponían, como sí sucedió en las demás T , pese a que se tenía conocimiento de que los chorros habían alcanzado el desarrollo total a partir de estas posiciones y que, por tal motivo, cumplían la condición de semejanza.

Lo anterior pudo indicar, tal vez, una desventaja en el mezclado, de tal manera que se necesitara de una mayor distancia en el eje x , para que, quizá, los perfiles u'_{rms} se superpusieran y de este modo esperar que el flujo se estabilizara. Por tal razón, resultaría conveniente dar seguimiento a esta investigación, con el objeto de poder corroborar esto y saber si esta diferencia es favorable o desfavorable en el mezclado.

Finalmente, los perfiles fluctuantes observados a las distancias de 16h y 24H no presentaron grandes diferencias en comparación con los demás perfiles u'_{rms} a estas mismas distancias.

En resumen, hay que enfatizar que en este segundo grupo, a una distancia de 8H, no existieron picos, lo que condujo a un mezclado demasiado rápido de los chorros junto con intensas fluctuaciones de velocidad. Por el contrario, las T del primer grupo, para esta misma posición, presentaron picos bien definidos y con ello, un retardo del mezclado de los chorros, así como menores fluctuaciones de velocidad.

Por otra parte, los resultados obtenidos del análisis del semiancho del chorro, mostraron que la $T = 1$ tuvo el mayor valor de ensanchamiento, le siguió en rapidez de ensanchamiento la $T = 0.5$ y, posteriormente, la correspondiente $T = 0.25$. Este orden indicó que las T de menor rapidez de mezclado son las que demostraron tener el mayor valor de ensanchamiento en la dirección transversal al flujo principal. Por consiguiente, las T que mostraron mayor rapidez de mezclado son las que tuvieron el valor de ensanchamiento más bajo, lo que señaló que estas T alcanzaron su desarrollo total a distancias mucho menores que las tres T anteriores, razón por la que no se abrió demasiado el chorro.

Asimismo, se pudo notar que la diferencia de velocidades medias entre los tres conductos trajo por consecuencia una disminución en el ensanchamiento del chorro compuesto, acentuándose esta tendencia, como ya se mencionó, para las T con mayor velocidad en el centro, como fueron las $T = 4$ y $T = 2$. En el caso del chorro central, únicamente fue notorio observar el incremento del valor relativo del ensanchamiento, por lo que se debió tener presente que en éste último se tomó para su normalización el semiancho de un solo conducto $\frac{H}{2}$, de tal manera que pareció que éste es mayor que el semiancho del chorro compuesto, pero no lo es tanto como aparentaba.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Adicionalmente, con base en los resultados anteriores, se tuvo que para las $T = 0.25$ y $T = 0.5$ la velocidad media central fue mayor que la de salida para toda x , ya que los chorros laterales, de alta velocidad media, le transmitían cantidad de movimiento al central y, por tal razón, lo contrario ocurrió para las $T = 1$, $T = 2$ y $T = 4$.

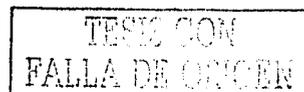
En otro orden de ideas, con el objeto de probar la similitud que existía entre los tres perfiles de velocidad media y fluctuante medidos a la salida de cada uno de los conductos, así como en tres puntos equidistantes a lo largo del eje z , se realizaron las pruebas de aceptación del equipo diseñado, encontrándose resultados satisfactorios.

En principio, se pudieron observar claramente los tres perfiles típicos de los flujos desarrollados en conductos planos, incluyendo las discontinuidades causadas por el espesor del acrílico de las dos placas internas, las cuales se lograron apreciar en los tres puntos medidos: superior, central e inferior. En general, los tres perfiles \bar{u} mantuvieron tanto velocidades medias como fluctuaciones de velocidad constantes en cada uno de los conductos para cada punto medido. Sin embargo, existió una pequeña diferencia de velocidad entre el punto central y los dos puntos restantes.

Esta diferencia radicó en que la máxima velocidad media de $\bar{u} = 5.924 \frac{m}{s}$ que se tenía en la parte central de los conductos fue mayor que las velocidades medias de $\bar{u} = 5.579 \frac{m}{s}$ desarrolladas en los puntos superior e inferior, respectivamente. El flujo tenía por tanto un perfil de velocidades medias semejante al parabólico, siendo la velocidad media máxima en el centro del conducto. Por lo cual hubiese sido erróneo haber encontrado diferencias de velocidad media entre estos últimos dos puntos, cosa que no sucedió. Asimismo, el valor del número de Reynolds fue poco mayor en el conducto uno, lo que indicó que existía menos fricción en la lona, por lo que la velocidad media fue mayor.

De igual manera, se observó un ensanchamiento mayor en este mismo conducto, lo que reflejó un pequeño incremento en el gasto másico calculado a la salida. Por tal razón, como estas condiciones se cumplieron, se pudo concluir que mediante estas sencillas pruebas el equipo diseñado construido con acrílico y el anemómetro de hilo caliente funcionaron correctamente, razón por la cual el sistema en general quedó validado.

Seguidamente, a través de la ecuación (4.1.5) se llevó a cabo una comparación entre el perfil de velocidad media obtenido en forma experimental con el equipo diseñado y el calculado a través de la ecuación (4.1.5), deducida por Görtler 1942 [102].



De los resultados, se observó que en forma general, a una distancia de 24H el chorro alcanzó su desarrollo total; es decir, que a esta distancia cumplió la condición de semejanza, notándose la distribución Gaussiana típica que presenta un chorro *libre* turbulento totalmente desarrollado, tal y como lo refirió White (1991) [24] en su libro. A su vez, el perfil teórico demostró tener una buena semejanza con el perfil experimental. Con esta comparación se pudo afirmar que existe una buena concordancia entre los resultados de este trabajo y la ecuación teórica (4.1.5) reportada previamente en la literatura.

Es importante señalar que el valor del número de Reynolds más cercano al presente trabajo correspondió al de Mattingly y Criminale (1971) [104], quienes en su trabajo reportaron, de igual manera, tanto los perfiles de velocidad media como las fluctuaciones de velocidad, entre otras cosas. Así, a partir de estos resultados se encontró una similitud favorable con los obtenidos en el presente estudio.

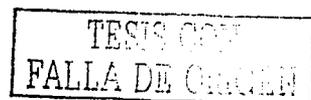
Complementariamente, se obtuvieron los resultados de las siguientes posiciones medidas en el mismo chorro solo: \bar{u} de salida, \bar{u} a 8H, \bar{u} a 16H y \bar{u} a 24H y sus respectivas partes fluctuantes. Por tanto, los resultados obtenidos fueron los siguientes: para la posición de salida se observó un perfil casi plano; esto se debió básicamente a la característica física que presenta un flujo turbulento desarrollado en un conducto rectangular. Al incrementarse la distancia a 8H, el chorro se desarrolló perdiendo esta característica y para distancias mayores a 16H alcanzó la condición de semejanza.

Asimismo, en cuanto a las fluctuaciones de velocidad u'_{rms} , a la salida fue notorio observar el bajo nivel de turbulencia que ahí existía; sin embargo, en la posición de 8H el pronto desarrollo del chorro generó cambios bruscos en sus fluctuaciones de velocidad y, sobre todo, a partir de la posición de 16H. En particular, se observó que para las distancias tanto de 16H como de 24H los perfiles fueron casi idénticos, presentando mínimas fluctuaciones de velocidad en la parte central del perfil y casi nulas en las fronteras del chorro.

5.2 Sumario de resultados

Este sumario condensa los resultados de dicho estudio, que por un lado muestra y enfoca el mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo en el marco de la literatura especializada en el tema y, por otro lado, a completa un espacio vacío dentro de la tendencia general de la mecánica de fluidos, para poder iniciar comparaciones entre los hallazgos del estudio y futuros trabajos dentro de la literatura.

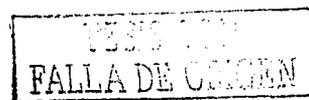
A continuación se presentan los resultados más relevantes de los objetivos planteados al inicio del presente trabajo de investigación:



1. El rango general de los valores calculados del número de Reynolds vario desde 0.14 a 0.40.
2. Existió similitud entre los tres perfiles de velocidades medias y fluctuantes medidos a la salida de cada uno de los tres conductos para tres posiciones equidistantes –superior, central e inferior– a lo largo del eje z. Con ello, quedó validado tanto el equipo diseñado como el anemómetro de hilo caliente.
3. La comparación realizada entre el perfil de velocidad media obtenido para el chorro central y el calculado a través de la ecuación (4.1.5) deducida por Görtler 1942 [102], puso de manifiesto la buena concordancia entre ambos.
4. Los perfiles de velocidad media y fluctuante para el chorro central para las posiciones de \bar{u} de salida, \bar{u} a 8H, \bar{u} a 16H y \bar{u} a 24H resultaron similares a los reportados con anterioridad por diversos investigadores, mismos que fueron medidos en un chorro *libre* plano turbulento.
5. El rango de los valores del número de Reynolds en que se encontraron las tasas de velocidad media fue de 0.10 a 0.60.
6. El valor del número de Reynolds más cercano al presente trabajo correspondió al de Mattingly y Criminale (1971) [104], quienes en su trabajo reportaron, de igual manera, tanto los perfiles de velocidad media como las fluctuaciones de velocidad, entre otras cosas.
7. Las $T = 1$, $T = 0.25$, $T = 0.5$ manifestaron un mezclado lento de los chorros y, por el contrario, las $T = 2$ y $T = 4$ presentaron un mezclado casi inmediato.
8. Los perfiles de velocidad media de las $T = 1$, $T = 0.25$, $T = 0.5$, $T = 2$ y $T = 4$ observaron a una posición de salida las características típicas que definen a los flujos desarrollados en conductos planos turbulentos, notándose las discontinuidades causadas por el espesor del acrílico de las dos placas internas. Del mismo modo, a medida que aumentaba la distancia a 8H iban perdiendo esta tendencia, ocasionando que los chorros se empezaran a mezclar, sin embargo a esta distancia aún se notaban los picos provenientes de los tres chorros.
9. Para una distancia de 16H los picos de los perfiles de velocidad media prácticamente se perdieron, mostrando una zona central casi plana en el centro del perfil y conforme aumentaba la distancia el mezclado originaba perfiles más continuos.
10. A partir de la posición de 24H los perfiles de velocidad media cumplieron la condición de semejanza, notándose la forma Gaussiana típica de los chorros turbulentos en conflujo.
11. Las fluctuaciones de velocidad de las T estudiadas mostraron que a la salida de los chorros se tenía la máxima fluctuación de velocidad u'_{rms} entre las capas de cortante de los chorros y el fluido de baja velocidad media del ambiente, así como las burbujas de recirculación localizadas en las placas intermedias del acrílico.
12. A una distancia de 8H se iniciaba el proceso de mezclado, presentando una región plana en el centro del perfil, lo que indicó un retardo del mezclado de los chorros. Asimismo, se tenían perfiles más estables con menos fluctuaciones de velocidad.



13. Las posiciones de 16H y 24H, cuando los perfiles ya habían alcanzado su desarrollo, señalaron valores bajos de fluctuaciones de velocidad en la región central del perfil y en las fronteras del chorro, adquiriendo un valor máximo en las capas de cortante entre el chorro desarrollado y el fluido de baja velocidad media del ambiente.
14. La mayor rapidez de mezclado de los chorros a partir de la distancia de 16H correspondió a la $T = 1$ en comparación con las $T = 0.25$ y $T = 0.5$ y lento con respecto a las $T = 2$ y $T = 4$.
15. Las $T = 1$, $T = 0.25$ y $T = 0.5$ presentaron el proceso de mezclado más lento, debido a que tuvieron los valores más altos de velocidad media en los conductos laterales; es decir, $\bar{u}_2 > \bar{u}_1$, en comparación con las $T = 2$ y $T = 4$, las cuales poseían velocidades medias menores en los conductos laterales; es decir, $\bar{u}_2 < \bar{u}_1$.
16. La $T = 0.5$ manifestó tener menor turbulencia y mayor rapidez de mezclado de los chorros a partir de una distancia de 8H en comparación con la $T = 0.5$.
17. Las $T = 2$ y $T = 4$ alcanzaron el desarrollo a partir de la posición de 8H, perdiendo por completo la visibilidad de los picos provenientes de los chorros; de tal manera que el proceso de mezclado había concluido cumpliéndose la condición de semejanza, lo que indicó que para estas T los chorros se desarrollaron a una distancia mucho menor en la dirección del eje x .
18. La $T = 4$ representó el mezclado más rápido de las T , en virtud de que tenía los valores de velocidades medias más bajos en los conductos laterales y alto en conducto central, ocasionando que este último absorbiera casi al instante a los dos chorros laterales, comportándose así como un solo chorro.
19. En la $T = 4$ existió un cambio brusco en la región central del perfil, lo que correspondió a un nivel más alto de turbulencia, de tal manera que estas fluctuaciones de velocidad parecían alcanzar la altura de los picos. Esto se debió, principalmente, a las bajas velocidades medias que se tenían en los conductos laterales y alta en el conducto central y como consecuencia de ello, el mezclado se hizo particularmente intenso, generando mayores capas de cortante entre los chorros.
20. La $T = 2$ manifestó un mezclado completamente homogéneo, efecto que no se vio en ninguna otra T a las distancias de 16H y 24H.
21. Las $T = 1$, $T = 0.25$ y $T = 0.5$ presentaron a una distancia de 8H picos bien definidos y con ello, un retardo del mezclado de los chorros, así como menores fluctuaciones de velocidad.
22. Las $T = 2$ y $T = 4$ señalaron a una distancia de 8H, no existieron picos, lo que condujo a un mezclado demasiado rápido de los chorros junto con intensas fluctuaciones de velocidad.
23. La $T = 1$ tuvo el mayor valor de ensanchamiento, le siguió en rapidez de ensanchamiento la $T = 0.5$ y, posteriormente, la correspondiente $T = 0.25$. Este orden indicó que las T de menor rapidez de mezclado son las que demostraron tener el mayor valor de ensanchamiento en la dirección transversal al flujo principal.



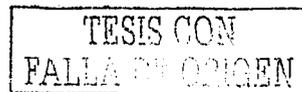
Por consiguiente, las T que mostraron mayor rapidez de mezclado son las que tuvieron el valor de ensanchamiento más bajo; lo que señalo que estas T alcanzaron su desarrollo total a distancias mucho menores que las demás T , razón por la que no se abrió mucho el chorro.

24. La diferencia de velocidades medias entre los tres conductos trajo por consecuencia una disminución en el ensanchamiento del chorro compuesto, acentuándose esta tendencia, para las T con mayor velocidad en el centro, como fueron las $T = 4$ y $T = 2$.
25. Por último, tanto en la $T = 0.25$ como en la $T = 0.5$, la velocidad media central fue mayor que la de salida para toda x , ya que los chorros laterales, de alta velocidad media, le transmitían cantidad de movimiento al central y, por tal razón, lo contrario ocurría para las $T = 1$, $T = 2$ y $T = 4$.

5.3 Recomendaciones para trabajos futuros

Debido a lo extenso del tema y con el objeto de a completar el espacio vacío que se tiene dentro de la literatura especializada en dicho tema, a continuación se enlistan las recomendaciones que se sugieren desarrollar con respecto a otros viables trabajos futuros sobre la base del trabajo iniciado tales como:

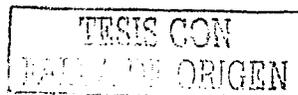
1. Determinar las dos componentes v y w tanto de la velocidad media como fluctuante para cada T planteada.
2. Obtener los esfuerzos de Reynolds para cada una de las T definidas.
3. Realizar visualización y digitalización de los patrones de flujo en el proceso de mezclado de los tres chorros *libres* planos en coflujo, de tal manera que se investigue la posible existencia de estructuras coherentes.
4. Calcular el número de Strouhal con el objeto de cuantificar la frecuencia de desprendimiento de los torbellinos que se forman en el mezclado.
5. Desarrollar un modelo numérico que permita predecir el proceso de mezclado de los tres chorros *libres* planos en coflujo, incluyendo las cuatro recomendaciones previas, y compararlas con estos resultados experimentales. Asimismo, incluir el análisis de la energía cinética turbulenta.
6. Finalmente, se recomienda estudiar los patrones de flujo que se presentan en un proceso de mezclado de tres chorros planos *confinados*. Para ello, se dispone de otro equipo con geometría también rectangular, tal y como se muestra en el plano A-004.



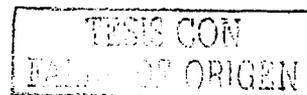
REFERENCIAS

- [1] Manero B. E., "Aplicación de un velocímetro láser-doppler a la medición de un chorro turbulento con partículas en suspensión", Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., 1989.
- [2] Durst F. y Zaré M., "Laser-doppler measurements in two-phase flows", Proc. de simposio de anemometría láser-doppler, Universidad de Dinamarca, 1975.
- [3] Milojevic D., "Confined jet two-phase flow", Ph. D. Thesis, Belgrade University, 1986.
- [4] Mendoza C. C., "Transferencia de calor en un flujo con partículas en suspensión: resultados experimentales", Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., 1996.
- [5] Ávila R. R., "Simulación de flujos turbulentos con partículas en suspensión", Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., 1993.
- [6] Hill J. C., Ann. Rev., Fluid Mech., Vol. 8, p. 135, 1976.
- [7] Liu J. T. C., Alper A. y Mankbudi R., "In structure and mechanisms in turbulence II", (ed. H. Fiedler), Lecture notes in physics, Vol. 76, p. 202, Springer, 1978.
- [8] Moore C. J., "In structure and mechanisms in turbulence II", (ed. H. Fiedler), Lecture notes in physics, Vol. 76, p. 254, Springer, 1978.
- [9] Fowcs Williams J. E. y Kempton A. J., "In structure and mechanisms in turbulence II", (ed. H. Fiedler), Lecture notes in physics, Vol. 76, p. 265, Springer, 1978.
- [10] Ruiz Rivas U., "Dinámica de vorticidad en el campo cercano de un chorro con coflujo y sometido a forzado axial", Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2000.
- [11] Giacosa Dante, Motores endotérmicos, Decimocuarta reimpresión italiana actualizada 1988, Ed. Omega, pp. 1-18, 103 y 384-387.
- [12] Obert Edward F., Motores de combustión interna. Análisis y aplicaciones, Vigésimoprimer reimpresión 1995, Ed. CECSA, pp. 21-29 y 559-570.
- [13] <http://www.tecno-racing.com/Potenciacion.htm>
- [14] Márquez Martínez Manuel, Combustión y quemadores, Primera edición 1989, Ed. Marcombo, Colección: productica, pp. 79-81.
- [15] http://aniversario.unet.edu.ve/mipv/cac/cac07_1.htm
- [16] Kondo A., Microcapsule processing and technology, Marcel Dekker, In., NewYork, 1979.
- [17] Dziezak J. D., "Microencapsulation and encapsulated ingredients", Food Technology, 42, pp. 136-151, 1988.
- [18] Fanger G. O., "What good are microcapsules?", Chem. Tech., 4, pp. 397-405, 1974.
- [19] Somerville G. R., "Multiorifice centrifugal head", U. S. Patent 3, 015, 128, 1960.
- [20] Somerville G. R., "Sloped head", U. S. Patent 3, 310, 612, 1967.
- [21] Somerville G. R., "Method for mass producing small spherical particles", U. S. Patent 3, 389, 194, 1968.

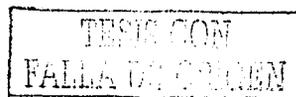
- [22] Scheller B. L. y Bousfield D. W., "Viscous jet breakup: nonsinusoidal disturbances", Chemical Engineering Communications, 107, pp. 35-53, 1991.
- [23] Scheele G. F. y Meister B. J., "Drop formation at low velocities in liquid-liquid systems. Part II. Prediction of jetting velocity", American Institute of Chemical Engineers Journal, 14, pp. 15-19, 1968.
- [24] White Frank M., "Viscous fluid flow", Mc Graw-Hill, 1991, pp. 470-478.
- [25] Abramovich G. N., The theory of turbulent jets, Massachussets Institute of Technology, Cambridge, Massachussets, p.V, 1963.
- [26] Beér J. M. y Chigier N. A., Combustion aerodynamics, Applied Science Publishers LTD, London, pp. 2-3, 1974.
- [27] Hinze J. O., Turbulence, McGraw-Hill, New York, Second Edition, p. 520, 1975.
- [28] Mih Walter C. y Hoopes John A., "Mean and turbulent velocities for plane jet", J. Hydraulics Division ASCE, HY7, p. 1275-1276, 1972.
- [29] Saiy M. y Peerless S. J., "Measurement of turbulence quantities in a two-stream mixing layer", J. Fluid Mech., Vol. 89, 1978, p. 710, 709-722.
- [30] Prandtl L. y Tietjens O., Fundamentals of hydro-and aero-mechanics, New York, 1934.
- [31] Abramovich G. N., The theory of turbulent jets, Massachussets Institute of Technology, Cambridge, Massachussets, p. 3-10, 1963.
- [32] Beér J. M. y Chigier N. A., Combustion aerodynamics, Applied Science Publishers LTD, London, pp. 10-11, 1974.
- [33] Van der Hegge Zijnen B. G., "Measurements of the velocity distribution in a plane turbulent jet of air", Appl. Sci. Res., A7, pp. 256-76, 1958.
- [34] Hinze J. O. y Van der Hegge Zijnen B. G., "Transfer of heat and matter in the turbulent mixing zone of an axially symmetric jet", Appl. Sci. Res., A1, p. 435, 1949.
- [35] Hinze J. O., Turbulence, McGraw-Hill, New York, 1959.
- [36] Hinze J. O., Turbulence, McGraw-Hill, New York, Second Edition, p. 177, 485, 1975.
- [37] Trüpel T., "Über die Einwirkung eines luftstrahles auf die umgebende luft", Zeitschrift für das gesammte turbinenwesen, 5-6, 1915.
- [38] Förthmann E., "Über turbulente strahlausbreitung", Ingr. Archiv., V. 1, 1934.
- [39] Townsend F. R. S., The structure of turbulent shear flow, Cambridge University Press, Second Edition, p. 3, 30, 1976.
- [40] Liepmann H. W. y Laufer J., "Investigation of free turbulent mixing", N. A. C. A. Tech., Note no. 1257, 1947.
- [41] Sunyach M. y Mathieu J., "Zone de mélange d'un jet plan", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 12, 1969.
- [42] Patel R. P., "A study of two dimensional symmetric and asymmetric turbulent shear flows", Ph. D. thesis, Dept. Mechanical Engineering, McGill University, 1970.



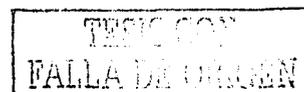
- [43] Bradbury L. J. S., "The structure of a self preserving turbulent plane jet", J. Fluid Mech., Vol. 23, p. 31, 1965.
- [44] Wygnanski I. J. y Fiedler H. E., "The two dimensional mixing region", J. Fluid Mech., Vol. 41, p. 327, 1970.
- [45] Peerless S. J., Ph. D. thesis, Faculty of Engineering, London University, 1971.
- [46] Spencer B. W., "Statistical investigation of turbulent velocity and pressure fields in a two stream mixing layer", Ph. D. thesis, Dept. Nuclear Engineering, University of Illinois, 1970.
- [47] Miller R. D., "Numerical and experimental investigations of the shear layer between two parallel streams", J. Fluid Mech., Vol. 33, p. 591, 1968.
- [48] Oster D. y Wygnanski I., "The forced mixing layer between parallel streams", J. Fluid Mech., Vol. 123, 1982, pp. 91-130.
- [49] Batt R. G., A.I.A.A., Vol. 13, p. 245, 1975.
- [50] Brown G. L. y Roshko A., J. Fluid Mech., Vol. 64, p. 775, 1974.
- [51] Champgne F. H., Pao Y. H. y Wygnanski I. J., J. Fluid Mech., Vol. 74, p. 209, 1976.
- [52] Dimotakis P. E. y Brown G. L., J. Fluid Mech., Vol. 78, p. 535, 1976.
- [53] Foss J. F., "In Proc. 1st Int. symp. on turbulent shear flows", Penn. State University, 1977.
- [54] Birch S. F., "In turbulence in internal flows", (ed. S. N. B. Murthy), Hemisphere, p. 89, 1977.
- [55] Oster D., Wygnanski I. J., Dziomba B. y Fiedler H. E., "In structure and mechanisms in turbulence I", (ed. H. Fiedler), Lecture notes in physics, Vol. 75, p. 48, Springer, 1978.
- [56] Hussain A. K. M. F. y Zedan M. F., Phys. Fluids, Vol. 21, p. 1100, 1978a.
- [57] Hussain A. K. M. F. y Zedan M. F., Phys. Fluids, Vol. 21, p. 1475, 1978b.
- [58] Browand F. K. y Latigo B. O., Phys. Fluids, Vol. 22, p. 1011, 1979.
- [59] Brown G. L. y Roshko A., "Turbulent shear flows", AGARD-CP-93, Vol. 23, p. 1, 1971.
- [60] Winant C. D. y Browand F. K., J. Fluid Mech., Vol. 63, p. 237, 1974.
- [61] Hernán M. A. y Jiménez J., "In proc. 2nd symp. On turbulent shear flows", London, 1979.
- [62] Chandrsuda C., Mehta R. D., Weir A. D. y Bradshaw P., J. Fluid Mech., Vol. 85, p.693, 1978.
- [63] Pui N. K. y Gartshore I, J. Fluid Mech., Vol. 91, p. 111, 1979.
- [64] Fiedler H. E. y Thies H. J., "In structure and mechanisms in turbulence I", (ed. H. Fiedler), Lecture notes in physics, Vol. 75, p. 108, Springer, 1978.
- [65] Ho C. M. y Nosseir N. S., J. Fluid Mech., Vol. 105, p. 119, 1981.
- [66] Flora Jr. James J. y Goldschmidt Victor W., "Virtual origins of a free plane turbulent jet", AIAA Journal, Vol. 7, No. 12, 1969, pp. 2344-2346.
- [67] Goldschmidt Victor W. y Bradshaw P., "Flapping of a plane jet", The Physics of Fluids, Vol. 16, No. 3, 1973, pp. 354-355.
- [68] Perry A. E. y Lim T. T., "Coherent structures in coflowing jets and wakes", J. Fluid Mech., Vol. 88, 1978, pp. 451-463.



- [69] Pui N. K. y Gartshore I. S., "Measurements of the growth rate and structure in plane turbulent mixing layers", *J. Fluid Mech.*, Vol. 91, 1979, pp. 111–130.
- [70] Perry A. E., Lim T. T. y Chong M. S., "The instantaneous velocity fields of coherent structures in coflowing jets and wakes", *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, 1980, pp. 243–256.
- [71] Rajagopalan S. y Antonia R. A., "Properties of the large structure in a slightly heated turbulent mixing layer of a plane jet", *J. Fluid Mech.*, Vol. 105, 1981, pp. 261–281.
- [72] Hernán M. A. y Jiménez J., "Computer analysis of a high-speed film of the plane turbulent mixing layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 119, 1982, pp. 323–345.
- [73] Lin S. J. y Corcos G. M., "The mixing layer: deterministic models of a turbulent flow. Part 3. The effect of plane strain on the dynamics of streamwise vortices", *J. Fluid Mech.*, Vol. 141, 1984, pp. 139–178.
- [74] Perry A. E. y Tan D. K. M., "Simple three-dimensional vortex motions in coflowing jets and wakes", *J. Fluid Mech.*, Vol. 141, 1984, pp. 197–231.
- [75] Jiménez J., Cogollos M. y Bernal L. P., "A perspective view of the plane mixing layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 152, 1985, pp. 125–143.
- [76] Hussain A. K. M. y Zaman K. B. M., "An experimental study of organized motions in the turbulent plane mixing layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 159, 1985, pp. 85–104.
- [77] Bernal L. P. y Roshko A., "Streamwise vortex structure in plane mixing layers", *J. Fluid Mech.*, Vol. 170, 1986, pp. 499–525.
- [78] Masutani S. M. y Bowman C. T., "The structure of a chemically reacting plane mixing layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 172, 1986, pp. 93–126.
- [79] Agüi J. C. y Hesselink L., "Flow visualization and numerical analysis of a coflowing jet: a three-dimensional approach", *J. Fluid Mech.*, Vol. 191, 1988, pp. 19–45.
- [80] Wygnanski I y Weisbrot I, "On the pairing process in an excited plane turbulent mixing layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 195, 1988, pp. 161–173.
- [81] Huang L-S. y Ho C-M, "Small-scale transition in a plane mixing layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 210, 1990, pp. 475–500.
- [82] Nygaard K. J. y Glezer A., "Evolution of streamwise vortices and generation of small-scale motion in a plane mixing layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 231, 1991, pp. 257–301.
- [83] Mehta R. D., "Effect of velocity ratio on plane mixing layer development: influence of the splitter plate wake", *Experiments in Fluids*, Vol. 10, 1991, pp. 194–204.
- [84] Bell J. H. y Mehta R. D., "Measurements of the streamwise vortical structures in a plane mixing layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 239, 1992, pp. 213–248.
- [85] Bell J. H. y Mehta R. D., "Effects of imposed spanwise perturbations on plane mixing-layer structure", *J. Fluid Mech.*, Vol. 257, 1993, pp. 33–63.
- [86] Nygaard K. J. y Glezer A., "The effect of phase variations and cross-shear on vortical structures in a plane mixing layer", *J. Fluid Mech.*, Vol. 276, 1994, pp. 21–59.



- [87] Nickels T. B. y Perry A. E., "An experimental and theoretical study of the turbulent coflowing jet", J. Fluid Mech., Vol. 309, 1996, pp. 157–182.
- [88] Tung S. y Kleis S. J., "Initial streamwise vorticity formation in a two-stream mixing layer", J. Fluid Mech., Vol. 319, 1996, pp. 251–279.
- [89] Naughton J. W., Cattafesta L. N. y Settles G. S., "An experimental study of compressible turbulent mixing enhancement in swirling jets", J. Fluid Mech., Vol. 330, 1997, pp. 271–305.
- [90] Everson R., Manin D. y Sirovich L., "Quantification of mixing and mixing rate from experimental observations", AIAA Journal., Vol. 36, No. 2, 1998, pp. 121–127.
- [91] Papadopoulos G. y Pitts W. M., "Scaling the near-field centerline mixing behavior of axisymmetric turbulent jets", AIAA Journal., Vol. 36, No. 9, 1998, pp. 1635–1642.
- [92] Dantec MT., Stream Line, Installation and user's reference manual, 1996, pp. Chapter 3–23,29.
- [93] Bruun H. H., Hot wire anemometry, Principles and signal analysis, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Bradford, Oxford Science Publications, 1996, pp. 22, 92–101.
- [94] Swaminathan M. K., Rankin G. W. y Sridhar K., "Some studies on hot wire calibration using Monte Carlo technique", J. Phys. E.: Sci. Instr., 17, 1984, pp. 1148–1151.
- [95] Bruun H. H., Khan M. A., Al-Kayiem H. H. y Fardad A. A., "Velocity calibration relationships for hot wire anemometry", J. Phys. E.: Sci. Instr., 21, 1988, pp. 225–232.
- [96] Pitts W. M. y McCaffrey B. J., "Response behaviour of hot wires and films to flows of different gases", J. Fluid Mech., 169, 1986, pp. 465–512.
- [97] George W. K., Beuther P. D. y Ahmad M., "Polynomial calibration and quasi-linearization of hot wires", Turbulence Research Laboratory Report, Sunny Buffalo, USA, 1981.
- [98] George W. K., Beuther P. D. y Shabbir A., "Polynomial calibrations for hot wires in thermally varying flows", Exp. Thermal and Fluid Sci., 2, 1989, pp. 230–35.
- [99] Swaminathan M. K., Rankin G. W. y Sridhar K., "A Note on the Response Equations for Hot Wire Anemometry", ASME, J. Fluids Eng., 108, 1986, pp. 115–118.
- [100] Bruun H. H. y Tropea C., "Calibration of normal, inclined and X-array hot wire probes", Technical Report SFB80/M/170 Sonderforschungs-Bereich 80, Universität Karlsruhe, 1980.
- [101] Bruun H. H. y Tropea C., "The calibration of inclined hot wires probes", J. Phys. E.: Sci. Instr., 18, 1985, pp. 405–413.
- [102] Görtler H., "Berechnung von aufgaben der freien turbulez auf grund eines neuen näherungsansatzes", Z. Angew. Math. Mech., Vol. 22, 1942, pp. 244–254.
- [103] Gunnar Heskestad, "Hot wire measurements in a plane turbulent jet", Journal of Applied Mechanics, 1965, pp. 721–734.
- [104] Mattingly George E. y Criminale Jr. W. O., "Disturbance characteristics in a plane jet", The Physics of Fluids, Vol. 14, Number 11, 1971, pp. 2258–2264.



- [105] Mih Walter C. y Hoopes John A., "Mean and turbulent velocities for plane jet", Journal of the Hydraulics Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, HY 7, July 1972, pp. 1275-1294.
- [106] Gutmark E. y Wygnanski I., "The planar turbulent jet", J. Fluid Mech., Vol. 73, Part 3, 1976, pp. 465-495.
- [107] Miller D. R. y Cominos E. W., J. Fluid Mech., 3, 1, 1957.
- [108] Van der Hegge Zijnen B. G., Appl. Sci. Res., A 7, 293, 1958.
- [109] Knystautas R., Aero Quart. 15, 1, 1964.
- [110] Bradbury L. J. S., J. Fluid Mech., 23, 31, 1965.
- [111] Heskestad G., J. Appl. Mech., 32, 721, 1965.
- [112] Thermo-Systems, Anemometry, 1973, Section II: pp. 1-14.
- [113] Hinze J. O., Turbulence. An introduction to its mechanism and theory, McGraw-Hill, New York, 1959.
- [114] Corrsin S., "Turbulence: experimental methods", In Handbuch der Physik, Springer, Berlin, Vol. 8.2, 1963, pp. 523-590.
- [115] Comte-Bellot G. y Schon J. P., "Harmoniques crees par excitation parametrique dans les anemometres a fil chaud a intensite constante", Int. J. Heat Mass Transf., 12, 1969, pp. 1661-1677.
- [116] Weske J. R., "A hot wire circuit with very small time lag", NACA Technical Note No. 881, 1943.
- [117] Ossofsky E., "Constant temperature operation of the hot wire anemometer at high frequency", Rev. Sci. Instr., 19, 1948, pp. 881-889.
- [118] Borgos J. A., "A review of electrical testing of hot wire and hot film anemometers", TSI Quart., VI, No. 3, 1980, pp. 3-9.
- [119] Freymuth P., "Feedback control theory for constant temperature hot wire anemometers", Rev. Sci. Instr., 38, 1967, pp. 677-681.
- [120] Perry A. E., Hot wire anemometry, Clarendon Press Oxford, 1982, p. 1.
- [121] Miller J. A., "A simple linearized hot wire anemometer", J. Fluids Eng., December, 1976, pp. 749-752.
- [122] Sandborn V. A., "Class notes for experimental methods in fluid mechanics", Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Colo., 1972.

APÉNDICE A DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

En el Departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, se realizaron estudios sobre el proceso de mezclado de tres chorros *libres* planos en coflujo. Para este efecto, se diseñó y construyó un equipo experimental cuyos planos de fabricación se muestran en las Figuras A1–A4.

A continuación se enlista el conjunto de materiales empleados en la construcción del equipo diseñado, desglosado por bloques que comprenden las partes que lo constituyen:

De esta manera, en el plano de la Figura A1 se observa una vista lateral del equipo, así como las vistas superior, inferior, frontal y posterior de los conductos rectangulares. En esta parte, el flujo se genera por medio de un turbosoplador y se hace pasar a través de un tanque para amortiguar cualquier oscilación producida por éste. Del tanque, el flujo se distribuye a los conductos mediante una "Y" doble. Finalmente, el flujo en cada conducto se controla por un sistema de válvulas, el cual entra a los conductos a través de bolsas de lona. Así, el material empleado en la construcción de los conductos es el siguiente:

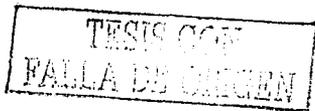
- Acrílico transparente de 6 mm de espesor cuyas dimensiones se especifican en los planos de las Figuras A1 y A2.

Por otra parte, los materiales usados en el sistema de distribución de flujo son los siguientes:

- Tres conectores de PVC de 3 in de diámetro nominal.
- Dos codos de 90° de PVC de 3 in de diámetro nominal.
- Cuatro codos de 45° de PVC de 3 in de diámetro nominal.
- 3.5 m de tramo recto de PVC de 3 in de diámetro nominal –seccionado–.
- Diez abrazaderas de 59/82 mm de diámetro.
- Una "Y" doble de PVC de 3 in de diámetro nominal.

Aunado a esto, los materiales utilizados para controlar el flujo inducido por el turbosoplador se enlistan a continuación:

- Tres válvulas tipo mariposa de 2 in de diámetro de hierro modular cromado.



- En la sujeción de las válvulas se diseñaron y construyeron seis bridas fabricadas con acrílico de 1.5 cm de espesor con dimensiones de 15 x 15 cm, mismas que tienen un orificio al centro de 3 in de diámetro.
- Tres placas de hierro, las cuales sujetan las válvulas por la parte frontal.
- 24 tuercas de 3/8 in de diámetro que sirven para sujetar las tres válvulas.
- 24 rondanas planas de 3/8 in de diámetro cuya función es sujetar las tres válvulas.
- 12 espárragos roscados de 13 cm de longitud y de 3/8 in de diámetro que sirven como elementos de sujeción para las tres válvulas.
- Seis mariposas de 1/4 in de diámetro como parte de la sujeción de las tres válvulas.
- 12 rondanas de 1/4 in de diámetro mediante las cuales se sujetan las tres válvulas.
- Seis tornillos de 6 cm de longitud y de 1/4 in de diámetro con los cuales se sujetan las tres válvulas.

Asimismo, en el plano de la Figura A2 se incluye un detalle de la vista lateral izquierda –pestañas–, así como las vistas lateral izquierda y derecha de los conductos; además, de la vista frontal y posterior de los conductos. De la misma manera, se presenta para las bolsas de lona.

En tanto, el material empleado en la elaboración de las lonas es el que sigue:

- Lona de 2 mm de espesor cuyas dimensiones se especifican en el plano de la Figura A2.

Posteriormente, el plano de la Figura A3 contiene el diseño del brazo mecánico transversal a la máquina posicionadora 3D que sostiene al portasensor de hilo caliente.

Es así que, los materiales usados en la fabricación del brazo se mencionan en seguida:

- Dos placas de acrílico transparente de 1.5 cm de espesor cuyas dimensiones se especifican en los planos de la Figura A3, mismas que van sujetas a la estructura vertical de la máquina 3D.
- Cuatro espárragos roscados, cada uno de 80 cm de longitud y 13/64 in de diámetro.
- 20 tuercas de 13/64 in de diámetro que sujetan la base estabilizadora de la barra, la base del portasensor de hilo caliente y los espárragos que van empotrados a las dos placas de acrílico.
- 16 rondanas de 13/64 in de diámetro que sujetan la base estabilizadora de la barra y la base del portasensor de hilo caliente.
- Dos placas de acero con 2.2 cm de espesor cuyas dimensiones se especifican en los planos de la Figura A3.
- Un tornillo allen de 13/64 in de diámetro que aprieta al portasensor de hilo caliente.
- Una llave allen de 13/64 in de diámetro.
- Una barra circular de acero inoxidable de 19/32 in de diámetro.

TESIS CON
FOLIO DE ORIGEN

- Cuatro tornillos de $13/64$ in de diámetro y 4 cm de longitud, mismos que fijan las dos placas de acrílico a la estructura vertical de la máquina 3D.

Por tanto, la importancia de citar el material utilizado en la construcción tanto del equipo como del brazo mecánico radica en que en un futuro, si fuese el caso, se puedan realizar cambios o mejoras en el diseño siguiendo esta línea de investigación.

TESIS CON
VALOR DE ORIGEN

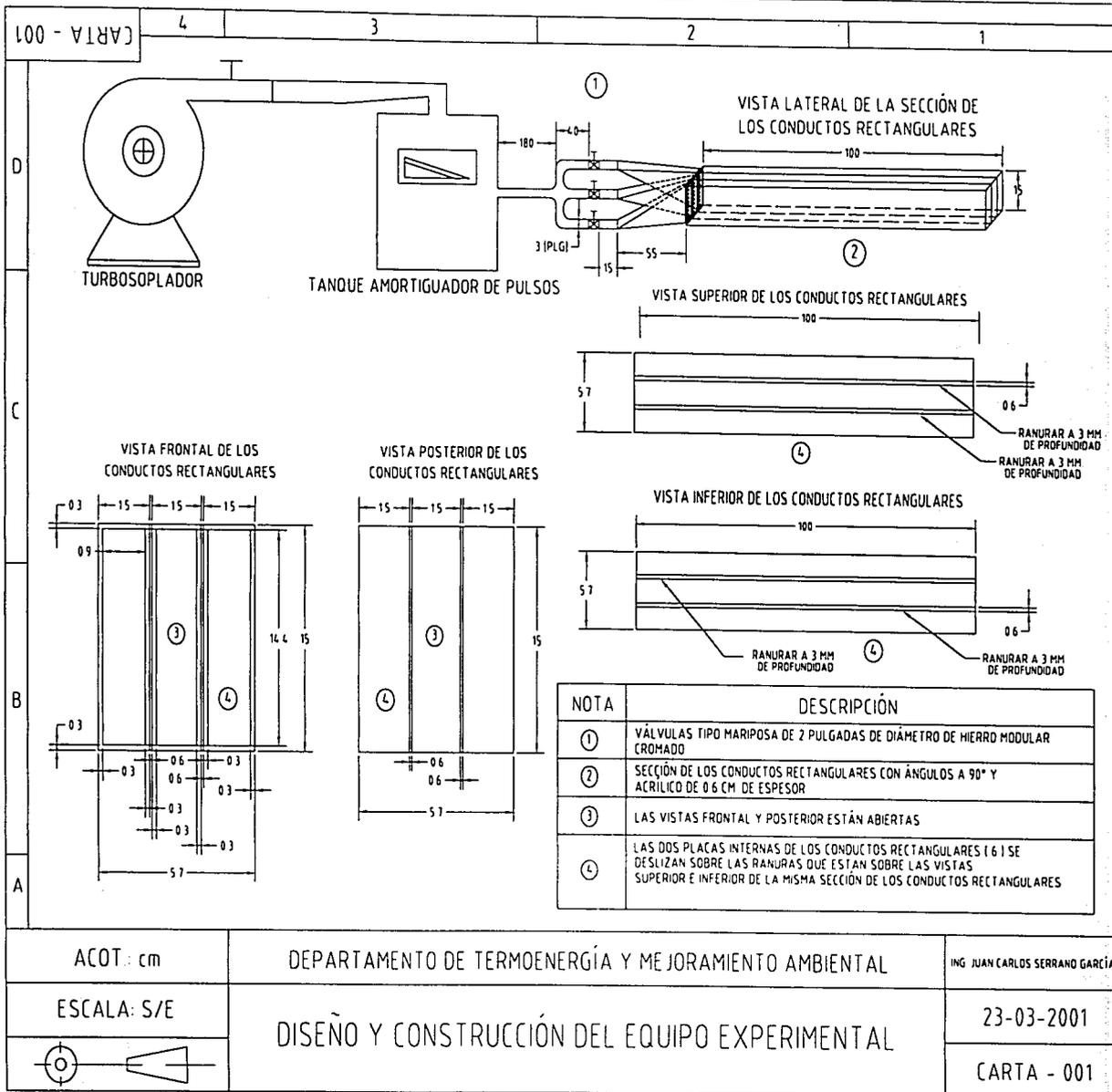
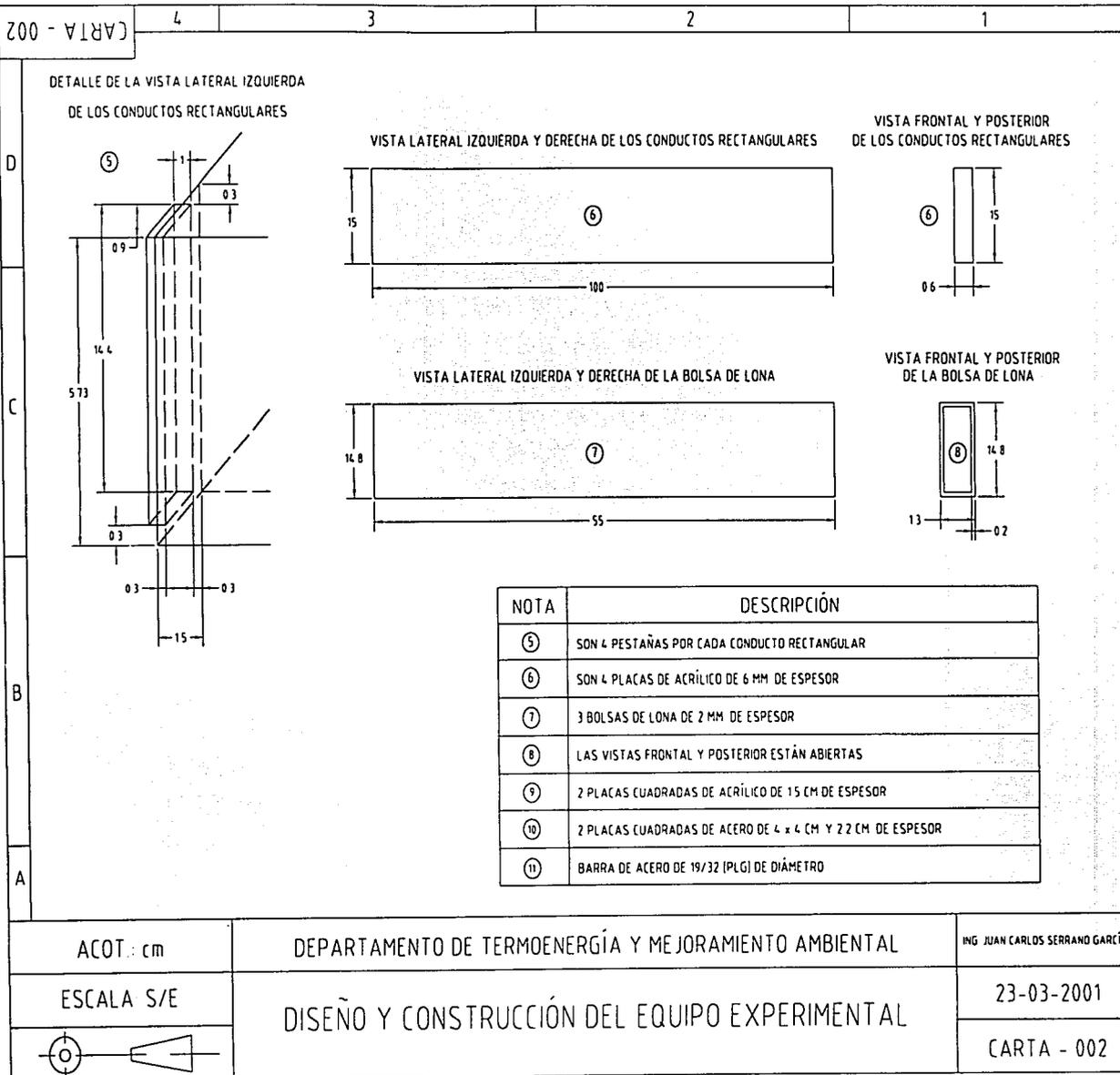
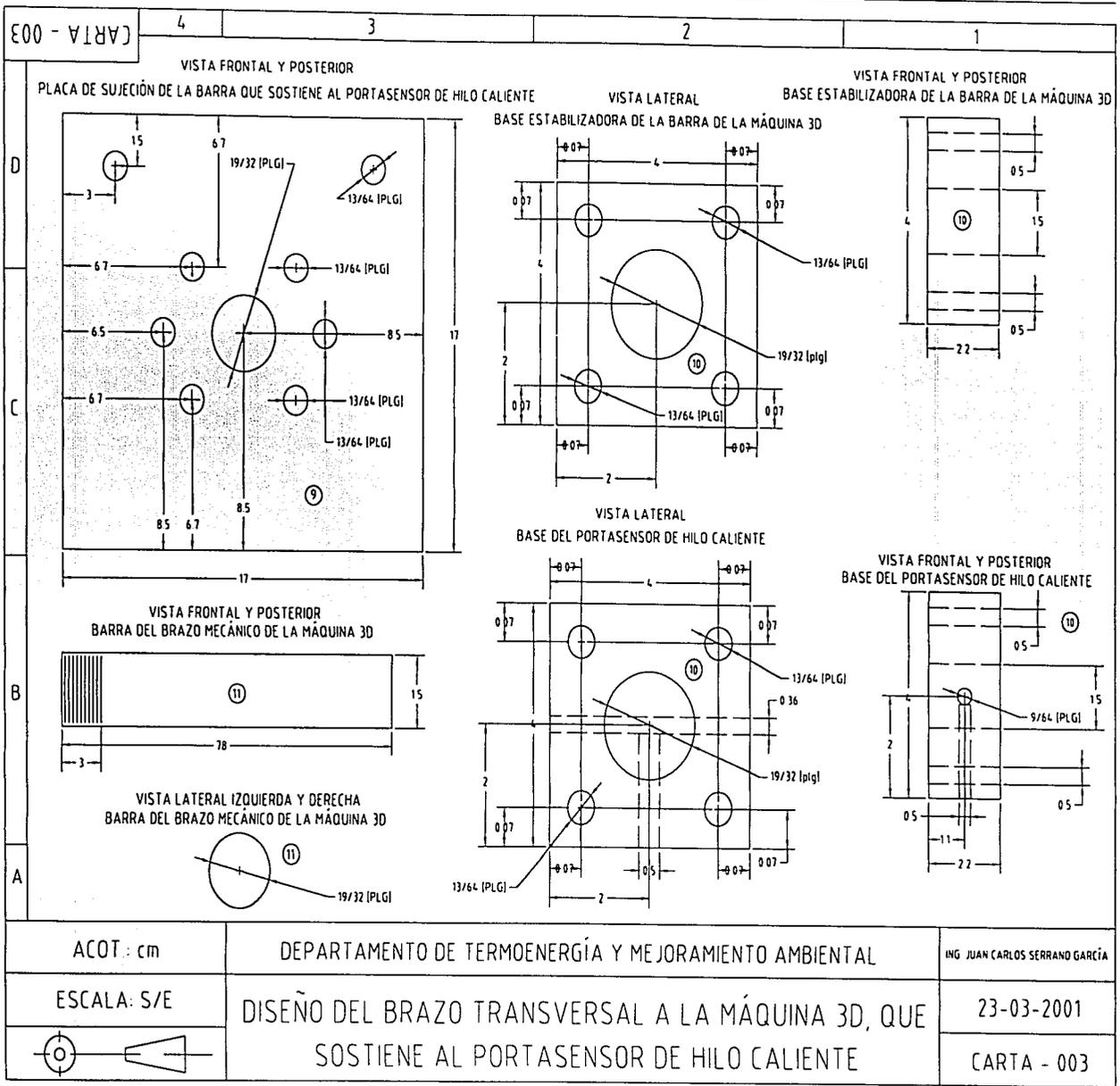


Figura A1 Diseño y construcción del equipo experimental



TESIS CON FOLIA DE ORIGEN

Figura A2 Diseño y construcción del equipo experimental

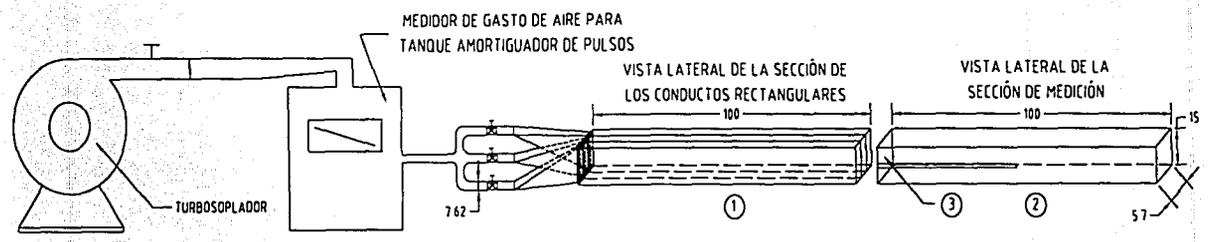


REVISADO CON
FALLA DE ORIGEN

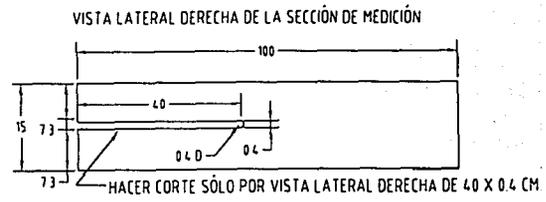
Figura A3 Diseño y construcción del equipo experimental

CARTA - 004 4 3 2 1

D
C
B
A



TESIS CON FALLA DE ORIGEN



NOTA	DESCRIPCIÓN
①	SECCIÓN DE LOS CONDUCTOS RECTANGULARES CON ÁNGULOS A 90°. ACRÍLICO DE 0.6 CM DE ESPESOR
②	SECCIÓN DE MEDICIÓN CON ÁNGULOS A 90°, ACRÍLICO DE 0.6 CM DE ESPESOR
③	LAS 4 VISTAS LATERALES VAN ABIERTAS

ACOT.: cm	DEPARTAMENTO DE TERMOENERGÍA Y MEJORAMIENTO AMBIENTAL	ING. JUAN CARLOS SERRANO GARCÍA
ESCALA: S/E	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEGUNDO EQUIPO EXPERIMENTAL	23-03-2001
		CARTA - 004

Figura A4. Diseño y construcción del segundo equipo experimental

APÉNDICE B DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL ANEMÓMETRO DE HILO CALIENTE

B.1 Introducción

El anemómetro de hilo caliente se ha empleado por muchos años como una herramienta de investigación en la mecánica de fluidos. Recientemente, la aplicación de la anemometría se ha expandido enormemente debido a mejoras en estos equipos, así como al creciente interés en conocer en detalle el flujo de fluidos. En general, la anemometría de hilo caliente se refiere al uso de un pequeño elemento eléctrico caliente expuesto a un flujo, con el propósito de medir una propiedad del medio, generalmente, esta propiedad es la velocidad media, dado que se tiene una transferencia de calor entre el elemento y el medio, que depende de las propiedades del flujo. Asimismo, se pueden medir cambios tanto en la temperatura como en la concentración.

Las Figuras B.1.1 y B.1.2 muestran una sonda de hilo caliente para una sola componente de velocidad media. En particular, las dimensiones típicas de un sensor son de 0.00015–0.0005 in ó 0.0038–0.005 mm de diámetro y 0.040–0.080 in ó 1.0–2.0 mm de longitud. En tanto, este tipo de sondas se usan para determinar el campo de velocidad media $\bar{u}(x, y)$ y fluctuante $u'(x, y)$, tal y como se menciona en Thermo-Systems Inc. (1973) [112].

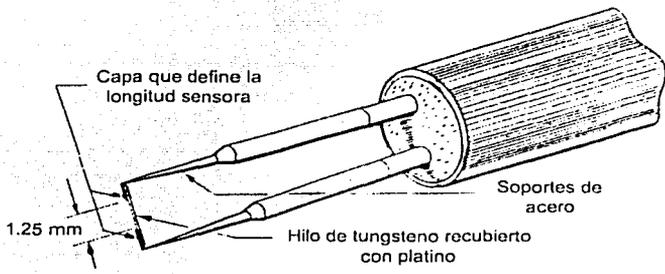


Figura B.1.1

Sensor de una sola componente. –Tomado de Thermo-Systems Inc. (1973) [112]–

Por otro lado, una parte muy importante del anemómetro son sus circuitos electrónicos. Éstos suministran una cantidad controlada de corriente eléctrica, la cual calienta al sensor y lo provee de una compensación de frecuencia. A su vez, un hilo caliente muy fino no puede responder por sí mismo a los cambios en la velocidad media del fluido a frecuencias por encima de los 500 Hz.

TPSIS CON
FALLA DE ORIGEN

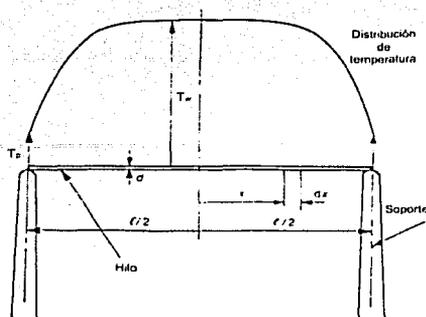


Figura B.1.2

Geometría de un sensor de hilo caliente de una sola componente. –Tomado de Bruun (1996) [93]–

Sin embargo, con la compensación electrónica, esta respuesta se puede incrementar hasta valores por encima de un millón de ciclos por segundo, como se menciona en Thermo-Systems Inc. (1973) [112]. Por ello, el anemómetro de temperatura constante, aunque ciertamente no presenta una innovación reciente, ha ganado rápidamente una aceptación durante los últimos años. Por tanto, este tipo de anemómetro opera utilizando una realimentación controlada, a través de un puente eléctrico, con el objeto de mantener al sensor a una temperatura constante.

B.2 Sondas

B.2.1 Sensores de hilo caliente:

Un sensor de hilo caliente debe tener dos características:

1. Alta dependencia de la resistencia eléctrica con la temperatura
2. Una resistencia eléctrica, de forma tal que pueda ser fácilmente calentada con una corriente eléctrica tanto a voltajes normales como a corrientes uniformes.

En general, los materiales más comunes con que se fabrican los hilos calientes son: tungsteno, platino, así como una aleación de platino-iridio. En particular, los hilos de tungsteno son fuertes y tienen un alto

coeficiente de $\frac{\text{resistencia}}{\text{temperatura}} = \frac{0.004 \Omega}{^\circ\text{C}}$. Sin embargo, no se pueden usar a temperaturas altas en muchos gases

debido a una pobre resistencia a la oxidación.

Por su parte, el de platino tiene una buena resistencia a la oxidación, así como un buen coeficiente de resistencia $0.003 \Omega / ^\circ\text{C}$, pero es muy débil, particularmente a altas temperaturas. En tanto, el hilo de platino-iridio es intermedio entre los de tungsteno y platino con una buena resistencia a la oxidación y más fuerte que el de platino; sin embargo, tiene un bajo coeficiente de resistencia $0.00085 \Omega / ^\circ\text{C}$. Por tanto, el hilo de tungsteno es el más comercial de los materiales de hilo caliente, como se señala en Thermo-Systems (1973) [112].

B.2.2 Características de calibración

La Figura B.2.2.1 muestra una curva de calibración de velocidad media típica para un hilo caliente de 0.002 in ó 0.051 mm de diámetro en una corriente de aire. Especialmente, el hilo caliente se emplea para medir temperatura, velocidad media, flujo de masa, conductividad térmica, presión, transferencia de calor y fracciones de masa a causa de las muchas variables que el hilo puede medir. Por esta razón, se debe tener cuidado en aislar o controlar todas las variables que no sean de interés, cuando se este midiendo una sola variable.

Es importante resaltar que mucha de la explicación de las características de calibración de la sonda de hilo caliente se ha expuesto en el Capítulo 3, Sección 3.3, por lo que en esta sección sólo se hace una mínima referencia a la calibración.

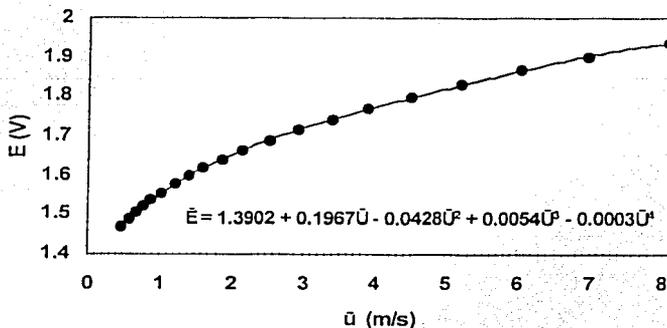


Figura B.2.2.1

Curva de calibración de un solo hilo obtenida en un rango de velocidad media entre 0.5–8 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

B.3 Circuitos de Control

Para hacer un buen uso del anemómetro de hilo caliente al realizar mediciones en la mecánica de fluidos, es de esencial importancia la selección del sensor. No obstante, el sensor debe ser controlado a través de circuitos electrónicos. De este modo, los dos tipos básicos de circuitos usados con sensores de hilo caliente son: el de corriente y temperatura constante.

B.3.1 Anemómetro de corriente constante

Un circuito típico de corriente constante contiene un puente de Wheatstone como el que se muestra en la Figura B.3.1.1. De aquí se puede seleccionar una velocidad específica y una tasa de resistencia eléctrica $\frac{R_w}{R_a}$ de sobrecalentamiento, de este modo, se calcula el valor de la resistencia eléctrica R_w ajustando la resistencia eléctrica R_3 mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{R_w + R_L}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \quad (\text{B.3.1.1})$$

Esta expresión se aplica cuando el puente está en equilibrio, lo cual se observa con un galvanómetro G.

Lo anterior se logra ajustando tanto la resistencia eléctrica R_s como la corriente eléctrica correspondiente I medida a través del hilo mediante un amperímetro A. Asimismo, durante la calibración, la corriente eléctrica I se mantiene constante para cada ajuste de velocidad media.

De igual manera, el puente se equilibra mediante los ajustes de las resistencias eléctricas R_3 y R_s , en tanto que el valor correspondiente de la resistencia eléctrica R_w se determina por la ecuación (B.3.1.1). Por tal motivo, este procedimiento hace laborioso el uso de anemómetros de corriente constante. De manera más específica, si se conoce el valor de I y se asume que $n = 0.5$, en tanto, el método de ajuste de mínimos cuadrados se puede aplicar a los datos de calibración para determinar las constantes A y B, por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{I^2 R_w}{R_w - R_a} = A + BU^n \quad (\text{B.3.1.2})$$

Adicionalmente, Hinze (1959) [113] menciona que lo anterior se cumple con la condición de que las fluctuaciones turbulentas sean de amplitud pequeña y frecuencia baja. Aunado a esto, la respuesta correspondiente a grandes fluctuaciones de velocidad han sido estudiadas por Corrsin (1963) [114] y Comte, Bellot y Schon (1969) [115].

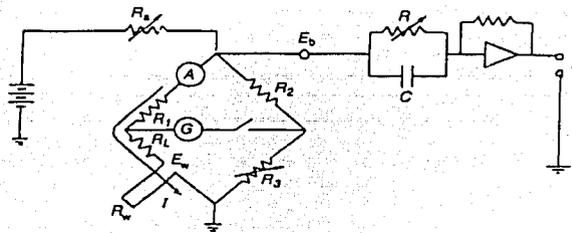


Figura B.3.1.1

Circuito típico de corriente constante incorporando un puente de Wheatstone, así como un circuito de compensación RC. –Tomado de Bruun (1996) [93]–

Es así que, la mayor desventaja de los sistemas de corriente constante es que la respuesta de frecuencia del sensor depende no sólo de las características de él, sino también de las características del flujo. En general, la respuesta depende de la capacidad térmica del sensor y del coeficiente de transferencia de calor entre el sensor y su medio. Por ello, a partir de los cambios experimentados en la respuesta del sensor por los cambios en el flujo –cambiando el coeficiente de transferencia de calor–, la compensación de la frecuencia del amplificador debe ser reajustada en cualquier momento en que se presenten cambios en el flujo medio, lo cual no es práctico para cambios rápidos.

Finamente, en el anemómetro de corriente constante la compensación es más aplicable donde las fluctuaciones de velocidad son muy pequeñas comparadas con la velocidad media. En conclusión, el anemómetro de hilo caliente operando a corriente constante es recomendable para mediciones de temperatura, cuando una corriente muy pequeña llegue a través del sensor, guardando un equilibrio con el fluido.

B.3.2 Anemómetro de temperatura constante

La Figura B.3.2.1 describe el principio de operación de un circuito a temperatura constante. Con la velocidad del flujo, el sensor tenderá a enfriarse provocando variaciones en la resistencia eléctrica. Estas variaciones ocasionan que el voltaje disminuya.

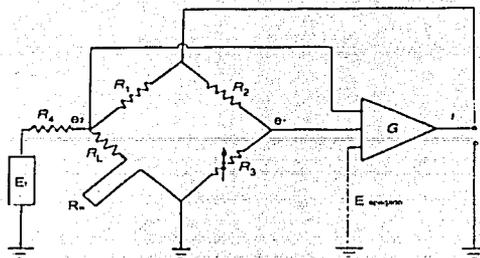


Figura B.3.2.1

Circuito típico operando a temperatura constante formado por un puente de Wheatstone, un amplificador diferencial y un subcircuito electrónico de prueba. –Tomado de Bruun (1996) [93]–

En principio, existen ventajas importantes en mantener el hilo caliente o película caliente a una temperatura operacional constante, es por ello que se debe mantener la resistencia eléctrica constante, ya que la inercia térmica del sensor se ajusta automáticamente cuando las condiciones del flujo varían. En general, este modo de operación se logra incorporando un amplificador diferencial de retroalimentación en el circuito de anemometría de hilo caliente, con el objeto de obtener una variación rápida en la corriente para compensar los cambios instantáneos en la velocidad del flujo.

Por su parte, Weske (1943) [116] y Ossofsky (1948) [117] mencionan que las ventajas de operación de un anemómetro de temperatura constante son conocidas desde su etapa inicial de aparición. Sin embargo, no fue sino hasta mediados de los años 60's cuando los anemómetros de temperatura constante empezaron a estar disponibles, en particular, gracias al desarrollo de amplificadores altamente estables.

En lo que se refiere a la sonda de hilo caliente, –al igual que en el modo de corriente constante– ésta se coloca en un puente de Wheatstone. Mientras tanto, como las condiciones del flujo varían, las diferencias de los errores de voltaje $e_2 - e_1$, serán una medida del cambio correspondiente en la resistencia eléctrica del hilo y, por lo tanto, estos dos voltajes forman la entrada al amplificador operacional.

Este amplificador tiene una corriente eléctrica de salida i , la cual es inversamente proporcional al cambio de la resistencia eléctrica del sensor de hilo caliente. En principio, la realimentación de esta corriente eléctrica en la parte superior del puente restablecerá la resistencia eléctrica de los sensores a su valor original, por lo que la realimentación es una condición en la que una porción de la salida regresa a la entrada. Hoy en día, los anemómetros comerciales de temperatura constante de alta calidad son más fáciles de conseguir.

Asimismo, los amplificadores tienen una respuesta muy rápida y, en el modo de temperatura constante, el sensor se puede mantener a una temperatura constante excepto para fluctuaciones de frecuencia muy altas. Es así, que los anemómetros modernos de temperatura constante a menudo contienen tanto un filtro de paso bajo para reducir el ruido electrónico como un circuito secundario para determinar y ajustar la relación de sobrecalentamiento, así como un circuito de onda cuadrada para pruebas de frecuencia y un mínimo de dos elementos para optimizar la respuesta de frecuencia a las fluctuaciones rápidas.

A su vez, Borgos (1980) [118] establece que los elementos más comunes que constituyen al anemómetro de temperatura constante son los siguientes:

1. Un cable compensado, un capacitor o un inductor en el puente, el cual se utiliza para variar la reactancia del puente.
2. Un compensador de voltaje (e apagado) en el amplificador, tal y como se muestra en la Figura (B.3.2.1).
3. Un amplificador de ganancia (G), como el que se muestra en la Figura (B.3.2.1).
4. Un circuito estabilizador o una tableta similar que contenga un circuito limitador en el amplificador.

Así, la tasa de resistencia $\frac{R_2}{R_1}$ que aparece en la Figura B.3.2.1 es conocida como la tasa de puente. Por tanto, para usar eficazmente la corriente disponible del amplificador, la resistencia eléctrica en el lado derecho del puente (pasiva) tiende a ser más grande que la resistencia eléctrica del lado izquierdo, la cual contiene a la sonda de hilo caliente. Es decir, la tasa de puente usualmente tiene un valor entre 5 y 20. De esta manera, si se desea tener una respuesta óptima de frecuencia, así como una compensación de cables muy largos se puede utilizar una tasa de puente de 1:1. Complementariamente, Freymuth (1967) [119] establece que el límite superior de la frecuencia de un anemómetro de corriente constante compensado es siempre más alto que uno descompensado. En cuanto a la respuesta dinámica, esta se rige por las ecuaciones de respuesta del puente, del sensor y del amplificador.

B.3.3 Comparación entre sistemas de anemometría

Los parámetros tanto de interferencia como de respuesta a la frecuencia deben estar presentes cuando se comparan circuitos de anemometría, mismos que aplican para mediciones de frecuencias altas en turbulencia. Por otro lado, el amplificador debe incrementar su compensación por respuesta retardada en el sensor cuando la frecuencia aumenta, usualmente también la amplitud de las fluctuaciones del flujo disminuye a altas frecuencias. Por ello, cuando se hacen mediciones cerca de los límites de funcionamiento de un anemómetro, el nivel de interferencia y la respuesta a la frecuencia son muy importantes.

Los anemómetros de corriente constante tienen bajos niveles de interferencia, así como altas respuestas a la frecuencia comparados con los de temperatura constante. Sin embargo, el uso de circuitos internos de estado sólido han eliminado estas ventajas y actualmente los mejores anemómetros de temperatura constante son comparables o superiores con el máximo desempeño de los de corriente constante, tanto en niveles de interferencia como en respuesta a la frecuencia. Asimismo, cabe destacar, que el nivel de interferencia, así como la respuesta a la frecuencia son ventajas en la operación y flexibilidad de los sistemas de anemometría.

Otras ventajas básicas de los anemómetros de temperatura constante son las siguientes:

1. Los anemómetros de temperatura constante son compatibles con los sensores de película, mientras que los de corriente constante no lo son, debido a las complejas características de respuesta a la frecuencia de las películas.
2. La operación de un sensor de temperatura constante previene su quemado cuando la velocidad de enfriamiento del sensor disminuye repentinamente.
3. La operación a temperatura constante es una aproximación más práctica para realizar mediciones en líquidos, donde ocurren grandes cambios en enfriamiento del sensor debido a cambios en la velocidad media.
4. La linealización es posible, mientras que con un anemómetro de corriente constante esto no es factible.
5. El anemómetro de temperatura constante puede tener compensaciones de temperatura y el otro no.
6. El anemómetro de temperatura constante da una salida directa de DC. Por el contrario, con un anemómetro de corriente constante, las mediciones de los niveles medios están hechas típicamente sobre la base de un balanceo manual del puente de Wheatstone, por lo que el límite de la frecuencia del amplificador –generalmente más bajo– suele ser alrededor de 2 Hz.

Por estas razones y también por la incapacidad de los anemómetros de corriente constante para medir grandes fluctuaciones de frecuencia, los anemómetros de temperatura constante han reemplazado esencialmente a los de corriente constante y, sobre todo, cuando se compara el anemómetro de temperatura constante es muy importante tomar en cuenta las tres variables básicas de diseño: respuesta a la frecuencia, nivel de interferencia y salida de potencia, como se especifica en Thermo-Systems (1973) [112]. Al respecto, cabe mencionar que Perry (1982) [120] ve al anemómetro de hilo caliente como un transductor térmico.

Actualmente, se dispone de muchas variedades de equipos comerciales de hilo caliente, así como diseños para montarlos uno mismo. De esto se pueden encontrar discusiones más detalladas en las referencias de Miller (1976) [121] y Sandborn (1972) [122].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

APÉNDICE C

CÁLCULO DE LOS VALORES DEL NÚMERO DE REYNOLDS

Este apéndice muestra el procedimiento que se siguió para estimar los siguientes valores del número de Reynolds:

- C1. Cálculo de los valores del número de Reynolds correspondientes a las pruebas de aceptación del equipo diseñado.
- C2. Cálculo del valor del número de Reynolds medido a la salida del chorro solo.
- C3. Cálculo de los valores del número de Reynolds correspondientes a las diferentes tasas de velocidad media.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

C.1 Cálculo de los valores del número de Reynolds correspondientes a las pruebas de aceptación del equipo diseñado

Valores del número de Reynolds calculados a la salida de cada uno de los tres conductos:

Tabla C.1.1

Valores de velocidades medias en cada uno de los tres conductos.

Punto superior			Punto central			Punto inferior		
Conducto 1	Conducto 2	Conducto 3	Conducto 1	Conducto 2	Conducto 3	Conducto 1	Conducto 2	Conducto 3
(m/s)								
1.698	0.518	0.518	0.508	3.175	0.508	2.310	0.518	0.518
4.050	1.159	1.458	3.220	4.777	3.629	4.050	1.159	2.380
4.721	4.073	4.530	4.660	5.070	5.040	4.721	3.470	4.530
5.060	4.818	5.020	5.096	5.345	5.426	5.060	4.560	4.970
5.257	5.060	5.270	5.303	5.640	5.689	5.257	4.970	5.250
5.400	5.257	5.400	5.564	5.800	5.830	5.400	5.257	5.400
5.525	5.400	5.525	5.721	5.898	5.898	5.525	5.400	5.525
5.553	5.525	5.553	5.830	5.924	5.924	5.553	5.525	5.553
5.579	5.553	5.579	5.898	5.890	5.910	5.579	5.553	5.579
5.532	5.579	5.532	5.924	5.820	5.800	5.532	5.579	5.532
5.460	5.532	5.440	5.871	5.680	5.640	5.460	5.532	5.440
5.337	5.440	5.337	5.760	5.520	5.355	5.310	5.440	5.310
5.159	5.337	5.159	5.600	5.276	5.087	5.060	5.337	5.090
4.940	5.159	4.870	5.385	4.860	4.602	4.660	5.159	4.720
4.510	4.962	4.206	5.004	4.281	3.360	3.880	4.880	3.780
2.136	4.593	1.807	3.757	1.203	0.692	2.136	4.380	2.200
0.508	3.534	4.450	4.944	5.010	4.649	0.508	2.750	4.486
4.496	0.633					4.471	0.633	
	4.341						4.228	
Promedio total								
Conducto 1	Conducto 2	Conducto 3	Conducto 1	Conducto 2	Conducto 3	Conducto 1	Conducto 2	Conducto 3
(m/s)								
4.637	4.526	4.529						

TESIS CON
 FOLIO DE ORIGEN

Tabla C.1.2

Cálculo de los valores del número de Reynolds en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1		Conducto 2		Conducto 3	
Número de Reynolds		Número de Reynolds		Número de Reynolds	
Long. caract. transversal =	0.015 m	Long. caract. transversal =	0.015 m	Long. caract. transversal =	0.015 m
Velocidad media =	4.637 m/s	Velocidad media =	4.526 m/s	Velocidad media =	4.529 m/s
Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s
Re _H =	4,576 = 0.46x10 ⁴	Re _H =	4,466 = 0.45x10 ⁴	Re _H =	4,469 = 0.45x10 ⁴
Gasto másico		Gasto másico		Gasto másico	
Base del conducto =	0.015 m	Base del conducto =	0.015 m	Base del conducto =	0.015 m
Altura del conducto =	0.15 m	Altura del conducto =	0.15 m	Altura del conducto =	0.15 m
Área del conducto =	0.00225 m ²	Área del conducto =	0.00225 m ²	Área del conducto =	0.00225 m ²
Velocidad media =	4.637 m/s	Velocidad media =	4.526 m/s	Velocidad media =	4.529 m/s
Densidad del aire =	0.93 kg/m ³	Densidad del aire =	0.93 kg/m ³	Densidad del aire =	0.93 kg/m ³
Gasto másico =	0.0097 kg/s	Gasto másico =	0.0095 kg/s	Gasto másico =	0.0095 kg/s

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

C.2 Cálculo del valor del número de Reynolds medido a la salida del chorro solo

Valor del número de Reynolds calculado a la salida del conducto 2:

Tabla C.2.1

Valores tanto de velocidades medias como del número de Reynolds calculado.

Conducto 2

(m/s)

0.795

2.554

4.492

4.678

4.875

4.981

4.993

5.083

5.075

4.984

4.913

4.746

4.544

4.249

3.353

0.795

4.066

Conducto 2

Número de Reynolds

Long. caract. transversal =	0.015	m
Velocidad media =	4.066	m/s
Visc. cinemática =	1.52E-05	m ² /s
Re _H =	4.013	= 0.40x10 ⁴

Gasto másico

Base del conducto =	0.015	m
Altura del conducto =	0.15	m
Área del conducto	0.00225	m ²
Velocidad media =	4.066	m/s
Densidad del aire =	0.93	kg/m ³
Gasto másico =	0.0085	kg/s

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

C.3 Cálculos de los valores del número de Reynolds correspondientes a las diferentes tasas de velocidad media

Valores del número de Reynolds calculados para la T = 1:

Tabla C.3.1

Valores de velocidades medias en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1	Conducto 2	Conducto 3
(m/s)	(m/s)	(m/s)
2.379	2.058	1.914
4.461	4.608	4.863
4.998	5.227	5.381
5.390	5.513	5.685
5.590	5.649	5.850
5.785	5.806	5.966
5.909	5.941	6.014
5.995	5.983	6.035
5.999	5.999	5.999
5.952	5.944	5.908
5.825	5.868	5.794
5.688	5.699	5.588
5.542	5.438	5.154
5.198	5.208	4.239
4.363	4.646	1.546
0.517	2.257	5.062
4.974	5.115	

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla C.3.2

Cálculo de los valores del número de Reynolds en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1		Conducto 2		Conducto 3	
Número de Reynolds		Número de Reynolds		Número de Reynolds	
Long. caract. transversal =	0.015 m	Long. caract. transversal =	0.015 m	Long. caract. transversal =	0.015 m
Velocidad media =	4.974 m/s	Velocidad media =	5.115 m/s	Velocidad media =	5.062 m/s
Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s
Re _H =	4.909 = 0.49x10 ⁴	Re _H =	5.048 = 0.50x10 ⁴	Re _H =	4.995 = 0.50x10 ⁴

Gasto másico		Gasto másico		Gasto másico	
Base del conducto =	0.015 m	Base del conducto =	0.015 m	Base del conducto =	0.015 m
Altura del conducto =	0.15 m	Altura del conducto =	0.15 m	Altura del conducto =	0.15 m
Área del conducto =	0.00225 m ²	Área del conducto =	0.00225 m ²	Área del conducto =	0.00225 m ²
Velocidad media =	4.974 m/s	Velocidad media =	5.115 m/s	Velocidad media =	5.062 m/s
Densidad del aire =	0.93 kg/m ³	Densidad del aire =	0.93 kg/m ³	Densidad del aire =	0.93 kg/m ³
Gasto másico =	0.0104 kg/s	Gasto másico =	0.0107 kg/s	Gasto másico =	0.0106 kg/s

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

Valores del número de Reynolds calculados para la $T = 0.25$:

Tabla C.3.3

Valores de velocidades medias en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1	Conducto 2	Conducto 3
(m/s)	(m/s)	(m/s)
1.516	0.705	0.709
2.873	0.829	2.537
3.432	0.941	3.374
3.674	0.983	3.603
3.865	1.009	3.853
3.931	1.005	3.956
3.965	0.963	3.992
4.005	0.887	4.005
3.998	0.824	3.981
3.961	0.693	3.944
3.885	0.607	3.781
3.729	0.859	3.598
3.564		3.263
3.176		2.605
2.295		0.820
3.458		3.201

TESIS CON
 VALIDA DE ORIGEN

Tabla C.3.4

Cálculo de los valores del número de Reynolds en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1		Conducto 2		Conducto 3	
Número de Reynolds		Número de Reynolds		Número de Reynolds	
Long. caract. transversal =	0.015 m	Long. caract. transversal =	0.015 m	Long. caract. transversal =	0.015 m
Velocidad media =	3.458 m/s	Velocidad media =	0.859 m/s	Velocidad media =	3.201 m/s
Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s
Re _H =	3.413 = 0.34x10 ⁴	Re _H =	848 = 0.08x10 ⁴	Re _H =	3.159 = 0.32x10 ⁴

Gasto másico		Gasto másico		Gasto másico	
Base del conducto =	0.015 m	Base del conducto =	0.015 m	Base del conducto =	0.015 m
Altura del conducto =	0.15 m	Altura del conducto =	0.15 m	Altura del conducto =	0.15 m
Área del conducto:	0.00225 m ²	Área del conducto:	0.00225 m ²	Área del conducto:	0.00225 m ²
Velocidad media =	3.458 m/s	Velocidad media =	0.859 m/s	Velocidad media =	3.201 m/s
Densidad del aire =	0.93 kg/m ³	Densidad del aire =	0.93 kg/m ³	Densidad del aire =	0.93 kg/m ³
Gasto másico =	0.0072 kg/s	Gasto másico =	0.0018 kg/s	Gasto másico =	0.0067 kg/s

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

Valores del número de Reynolds calculados para la $T = 0.5$:

Tabla C.3.5

Valores de velocidades medias en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1	Conducto 2	Conducto 3
(m/s)	(m/s)	(m/s)
1.094	0.736	2.484
2.806	1.262	3.276
3.465	1.610	3.728
3.650	1.792	3.893
3.822	1.937	3.968
3.931	2.031	4.055
3.972	2.024	4.051
4.038	2.026	4.055
4.031	2.019	3.990
4.019	1.939	3.836
3.929	1.752	3.669
3.848	1.541	3.325
3.715	1.217	2.781
3.373	0.695	1.127
2.599	1.613	3.446
0.518		
3.301		

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla C.3.6

Cálculo de los valores del número de Reynolds en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1			Conducto 2			Conducto 3		
Número de Reynolds			Número de Reynolds			Número de Reynolds		
Long. caract. transversal =	0.015	m	Long. caract transversal =	0.015	m	Long. caract transversal =	0.015	m
Velocidad media =	3.301	m/s	Velocidad media =	1.613	m/s	Velocidad media =	3.446	m/s
Visc. cinemática =	1.52E-05	m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05	m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05	m ² /s
Re _H =	3.258	= 0.33x10 ⁴	Re _H =	1.592	= 0.16x10 ⁴	Re _H =	3.401	= 0.34x10 ⁴

Gasto másico			Gasto másico			Gasto másico		
Base del conducto =	0.015	m	Base del conducto =	0.015	m	Base del conducto =	0.015	m
Altura del conducto =	0.15	m	Altura del conducto =	0.15	m	Altura del conducto =	0.15	m
Área del conducto.	0.00225	m ²	Área del conducto	0.00225	m ²	Área del conducto	0.00225	m ²
Velocidad media =	3.301	m/s	Velocidad media =	1.613	m/s	Velocidad media =	3.446	m/s
Densidad del aire =	0.93	kg/m ³	Densidad del aire =	0.93	kg/m ³	Densidad del aire =	0.93	kg/m ³
Gasto másico =	0.0069	kg/s	Gasto másico =	0.0034	kg/s	Gasto másico =	0.0072	kg/s

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Valores del número de Reynolds calculados para la $T = 2$:

Tabla C.3.7

Valores de velocidades medias en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1 (m/s)	Conducto 2 (m/s)	Conducto 3 (m/s)
0.549	1.865	0.708
0.926	3.186	1.233
1.334	3.544	1.567
1.585	3.707	1.769
1.725	3.839	1.893
1.839	3.936	2.001
1.923	4.000	2.000
2.001	3.968	1.960
1.984	3.942	1.892
1.931	3.909	1.744
1.840	3.800	1.561
1.744	3.697	1.180
1.611	3.490	0.766
1.073	3.081	1.559
0.515	2.106	
1.505	3.471	

TESIS CON
VALIA DE ORIGEN

Tabla C.3.8

Cálculo de los valores del número de Reynolds en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1		Conducto 2		Conducto 3	
Número de Reynolds		Número de Reynolds		Número de Reynolds	
Long. caract. transversal =	0.015 m	Long. caract. transversal =	0.015 m	Long. caract. transversal =	0.015 m
Velocidad media =	1.505 m/s	Velocidad media =	3.471 m/s	Velocidad media =	1.559 m/s
Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s
Re _H =	1.485 = 0.15x10 ⁴	Re _H =	3.425 = 0.34x10 ⁴	Re _H =	1.538 = 0.15x10 ⁴

Gasto másico		Gasto másico		Gasto másico	
Base del conducto =	0.015 m	Base del conducto =	0.015 m	Base del conducto =	0.015 m
Altura del conducto =	0.15 m	Altura del conducto =	0.15 m	Altura del conducto =	0.15 m
Área del conducto =	0.00225 m ²	Área del conducto =	0.00225 m ²	Área del conducto =	0.00225 m ²
Velocidad media =	1.505 m/s	Velocidad media =	3.471 m/s	Velocidad media =	1.559 m/s
Densidad del aire =	0.93 kg/m ³	Densidad del aire =	0.93 kg/m ³	Densidad del aire =	0.93 kg/m ³
Gasto másico =	0.0031 kg/s	Gasto másico =	0.0073 kg/s	Gasto másico =	0.0033 kg/s

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Valores del número de Reynolds calculados para la T = 4:

Tabla C.3.9

Valores de velocidades medias en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1 (m/s)	Conducto 2 (m/s)	Conducto 3 (m/s)
0.551	0.792	0.595
0.726	2.565	0.775
0.889	3.316	0.905
0.983	3.623	0.995
1.053	3.842	1.052
1.083	3.951	1.063
1.090	4.000	1.053
1.058	4.009	0.979
1.021	4.015	0.889
0.885	3.991	0.754
0.776	3.951	0.547
0.578	3.880	0.873
0.891	3.724	
	3.433	
	2.959	
	1.385	
	3.340	

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla C.3.10

Cálculos de los valores del número de Reynolds en cada uno de los tres conductos.

Conducto 1		Conducto 2		Conducto 3	
Número de Reynolds		Número de Reynolds		Número de Reynolds	
Long. caract. transversal =	0.015 m	Long. caract. transversal =	0.015 m	Long. caract. transversal =	0.015 m
Velocidad media =	0.891 m/s	Velocidad media =	3.340 m/s	Velocidad media =	0.873 m/s
Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s	Visc. cinemática =	1.52E-05 m ² /s
Re _H =	879 = 0.09x10 ⁴	Re _H =	3.296 = 0.33x10 ⁴	Re _H =	862 = 0.09x10 ⁴

Gasto másico		Gasto másico		Gasto másico	
Base del conducto =	0.015 m	Base del conducto =	0.015 m	Base del conducto =	0.015 m
Altura del conducto =	0.15 m	Altura del conducto =	0.15 m	Altura del conducto =	0.15 m
Área del conducto =	0.00225 m ²	Área del conducto =	0.00225 m ²	Área del conducto =	0.00225 m ²
Velocidad media =	0.891 m/s	Velocidad media =	3.34 m/s	Velocidad media =	0.873 m/s
Densidad del aire =	0.93 kg/m ³	Densidad del aire =	0.93 kg/m ³	Densidad del aire =	0.93 kg/m ³
Gasto másico =	0.0019 kg/s	Gasto másico =	0.0070 kg/s	Gasto másico =	0.0018 kg/s

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN