

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

70
Zejeu

TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

**TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
(ÁREA MECÁNICA)**

**PRESENTA:
GABRIEL FERNÁNDEZ ARES DE PARGA**

**DIRECTOR:
M.I. J. ESTEBAN BARRIOS BONILLA**

**MEXICO, D.F.
1995**

FALLA DE ORIGEN

**TESIS 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.

ESTE TRABAJO SE LO DEDICO A MIS PADRES QUIENES HAN SIDO PARA MI LO MÁS IMPORTANTE EN MI VIDA. ESPERO QUE ESTA TESIS PUEDA REGRESARLES ALGO DE LA SATISFACCIÓN QUE SIEMPRE HE SENTIDO AL SER HIJO SUYO.

También dedicó este trabajó a:

Mis hermanos Juan Vicente y Antonio, quienes son parte fundamental en mi vida.

A ti Nuny, gracias entre muchas cosas por tu constante apoyo, amor y cariño.

A mi Tío Antonio, quién admiro y quiero mucho.

A mi Tía Lola quién siempre me ha querido mucho.

Amis Abuelas.

Agradecimientos

A mi primo Emilio Salinas quiero agradecer su valiosa ayuda. Me gustaría agradecer mucho a mis amigos Jorge Schiavon, Carlos Cantú y José Antonio Moratinos con quienes he compartido mis estudios, así como gran parte de mi vida. A mi amiga Mónica Ramirez, muchas gracias. También me gustaría agradecer Ing. José Esteban Barrios Bonilla quién ha sido parte fundamental en la elaboración de este trabajo, además de ser una persona muy valiosa y un buen amigo. Al Sr. Ing. José Manuel Covarrubias, Director de la Facultad de Ingeniería, muchas gracias por su incondicional apoyo. A la Sra. Carmen Reyes, nunca olvidaré la ayuda y amistad que me ha brindado. A la Sra. Mireya Fernández, gracias. Al Dr. Francisco Solorio y al Ing. Luis Cerecedo gracias por su importante ayuda. Finalmente me gustaría agradecer mucho al M.I. Juan Napier Dyer quién ha sido mi profesor durante casi toda mi vida.

TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

	Pag.
INDICE	1-2
PRÓLOGO	3
CAPÍTULO 1	
ANTECEDENTES	4-5
CAPÍTULO 2	
ASPECTOS TEÓRICOS / o PRELIMINARES	
2.1 TURBULENCIA	6-11
-Introducción	
-Importancia de la turbulencia en la mecánica de fluidos	
2.2 MEDICIÓN DE VELOCIDAD EN DUCTOS	12-17
-Introducción	
-Métodos Directos	
-Selección del Mejor Equipo para Trabajar	
2.3 ANEMOMETRÍA LÁSER-DOPPLER	18-27
-Introducción	
-Historia y Principio de Funcionamiento	
-Partículas en Anemometría Láser-Doppler	
-Ventajas del Sistema Láser-Doppler	
-Posicionadores	

2.4 ANÁLISIS ADIMENSIONAL	28-33
Introducción	
Desarrollo	
CAPÍTULO 3	
DESARROLLO EXPERIMENTAL	34-41
Introducción	
Presentación del Modelo Experimental	
Desarrollo del Experimento	
Problemas Presentados Durante la Experimentación	
CAPÍTULO 4	
RESULTADOS	42-64
Introducción	
Tablas y Gráficas	
CAPÍTULO 5	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65-68
REFERENCIAS.	69-70

Prólogo

Este trabajo tiene como principal objetivo el conocer el flujo que se genera dentro de tubos en forma helicoidal. Particularmente este trabajo estudiará la intensidad de turbulencia y otros aspectos importantes relacionados con este tipo de geometrías como el número de Reynolds y los perfiles de velocidad. El fin de este estudio es poder predecir el comportamiento de este tipo de dispositivos en forma general, es decir para cualquier geometría y condición de flujo. Para ello se contemplará dentro de este trabajo el concepto y la importancia de la turbulencia, los equipos de medición de velocidad y turbulencia así como el estudio adimensional que nos llevará a cumplir con los fines y objetivos de esta tesis. La importancia de este proyecto es aplicable a muchos problemas en donde se requiera generar turbulencia para mejorar ciertos procesos como se verá en el desarrollo del trabajo.

ANTECEDENTES

Importancia de los Tubos Helicoidales

La principal razón por la cual se utilizan tubos helicoidales es para tratar de aumentar notablemente la transferencia de calor y masa durante algún proceso. Este incremento se produce principalmente gracias a que la frontera de los tubos forzan al fluido a seguir un camino curvo, produciendo así una fuerza centrífuga e induciendo flujos secundarios. Además de provocar incrementos en los coeficientes convectivos de transferencia de calor, la utilización de este tipo de geometría aumentan el área de contacto por unidad de longitud. Como podemos ver, existen beneficios significativos para justificar el uso de este tipo de dispositivos. Ahora, como en todo, existen también algunas desventajas. La principal es el hecho de que la caída de presión en el dispositivo es mayor de la que se tendría en caso de no emplearlo.

Algunos autores que se han encargado de estudiar este tipo de dispositivos han determinado ciertas aplicaciones que se mencionarán más adelante. Principalmente Nandakumar y Masliyah de la universidad de Alberta en Canada¹, han formulado relaciones entre los coeficientes de fricción y la transferencia de calor. En otras palabras han tratado de determinar si existe o no un beneficio al usar estos tubos para incrementar el flujo de calor pero teniendo una caída de presión más alta.

Dentro de las aplicaciones que se encuentran para los tubos helicoidales tenemos una gran variedad. Se pueden utilizar en condensadores, en intercambiadores de calor para reactores nucleares, en calderas de potasio para ciclos Rankine avanzados y para transportar líquidos con materia insoluble. Otras aplicaciones que se tienen son el modelar flujos en tuberías flexibles con aplicaciones potenciales en el ramo biomédico².

Es muy importante observar que el estudio de los flujos a través de estos dispositivos es sin lugar a dudas sumamente complicado, de hecho se requieren de marcos de referencia muy complicados y que giren con la geometría ya que la falta de un sistema ortogonal es evidente. Antagónicamente, se presentan dos factores importantes, el aumento de la transferencia de calor por un lado y la caída de presión por el otro. Para poder valuar todo esto es necesario recurrir al estudio adimensional de los problemas para así gracias a la experimentación poder llegar a expresiones en términos de parámetros adimensionales

¹Referencia 1

²Referencia 2

conocidos. Hoy en día no existen resultados experimentales valuados en tuberías de este tipo por lo que es importante tratar de estudiarlos.

Dentro del capítulo donde se trate el desarrollo experimental, encontraremos las principales características geométricas de los tubos helicoidales que manejaremos, así como esquemas de los mismos.

Es por todo esto la necesidad de encontrar un equipo adecuado para la medición de la velocidad promedio y de la intensidad de la turbulencia ya que gracias a esta, podemos determinar otros parámetros importantes. Existen un sin número de aparatos que miden la velocidad en ductos. Dentro de esta gama de elementos de medición existen diversas formas de medir, es decir por presión, por luz etc. En el capítulo siguiente se mostrarán brevemente algunos de los equipos diferentes con los que se cuenta para medir la velocidad. También en el capítulo siguiente se determinará el equipo de medición con el cual se lleve a cabo el experimento de los mezcladores helicoidales y poder determinar las velocidades y sus fluctuaciones, objetivo principal de éste trabajo. El enfoque de estudiar las intensidades de turbulencia es diferente al punto de vista de otros autores como vimos anteriormente.

ASPECTOS TEÓRICOS / o PRELIMINARES

2.1 TURBULENCIA

Introducción:

Gracias al experimento de Osborne Reynolds en 1883, podemos diferenciar un flujo turbulento de un flujo laminar. Un flujo se puede considerar turbulento cuando su transferencia de momentum se da a nivel macroscópico y no solo a nivel molecular como en un flujo laminar. Esto es, en un flujo laminar no existe movimiento de fluido a través de las diferentes capas mientras que dentro de un régimen de turbulencia pasa todo lo contrario.

El número de Reynolds, es una relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, y dependiendo de su valor podemos determinar que tipo de régimen tenemos. Cuando tenemos un flujo turbulento, es muy difícil establecer modelos matemáticos que simulen adecuadamente el flujo, por lo que en la mayoría de los casos se recurre a la experimentación o al uso de herramientas de cómputo.

Es muy importante comprender que en un modelo turbulento no se tienen velocidades fijas, sino que la velocidad del flujo es fluctuante en todo momento. Por esta razón se tiene una velocidad media y una parte variable. A continuación se presenta una gráfica en donde podemos ver claramente la variación de la velocidad cuando tenemos un flujo turbulento¹ :

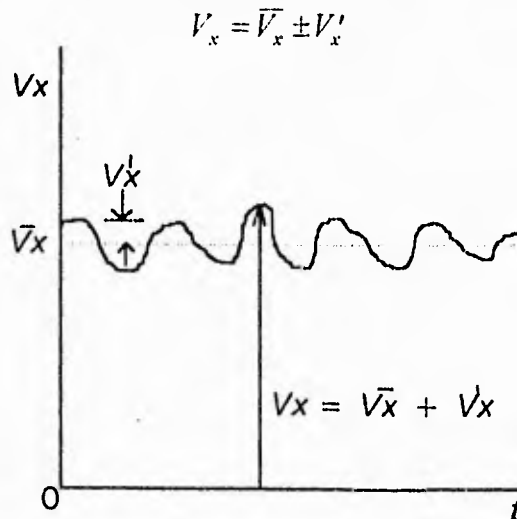


Fig. 1 Variación de la velocidad con el tiempo en flujo turbulento.

¹ Referencia 3

De esta manera la velocidad varía en todo momento, por lo que es de gran utilidad el poder conocer la velocidad más representativa de dicho flujo. Esta es la velocidad media que se puede calcular integrando en el tiempo. La ecuación se presenta a continuación² :

$$\bar{V}_x = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} V_x dt$$

Es conveniente aclarar que esta ecuación es para flujos turbulentos estables ya que aquellos que no lo sean presentan variación de la velocidad media en todo momento. Es decir estos flujos mantienen una velocidad media constante.

Cuando se trabaja con un fluido que fluye en algún conducto, es importante observar las características del fluido con el que se trabaja. El número de Reynolds se encuentra definido de la siguiente manera:

$$R = \frac{VD\rho}{\mu} \text{ donde}$$

V es la velocidad media
 D es el diametro del conducto
 ρ es la densidad del fluido
 μ es la viscosidad del fluido

Las características o propiedades dinámicas importantes de los fluidos son la viscosidad y la densidad. Gracias al número de Reynolds podemos relacionar los efectos viscosos con los dinámicos. Así al variar la velocidad, densidad y viscosidad, variará el tipo de flujo que se tenga pudiendo pasar de laminar a turbulento. En un flujo laminar, las capas de fluido se mantienen paralelas unas con otras, además de que las velocidades no fluctúan. Por el otro lado en el momento de que un flujo viscoso se vuelve inestable, es decir pasa de ser laminar a turbulento, en alguna región, los remolinos o *eddies* se dispersarán a lo largo de toda la sección del flujo; por lo que se producirá un complejo patrón de movimiento que varía continuamente con el tiempo. Este fenómeno es conocido como flujo turbulento. Las líneas de flujo ahora se encuentran entretejidas y cambiando de forma de momento a momento. La turbulencia es la completa antítesis del flujo laminar.³ La turbulencia no solo engloba un continuo intercambio de fluido entre zonas vecinas del flujo, sino

² Referencia 3

³ Referencia 4

que también produce una energía de disipación rápida y grande gracias al abrupto cambio en la relación entre el gradiente de presión y la velocidad media que se representó en la figura 1. Algunas partes del fluido con gran energía cinética son acarreadas desde una región central a la periferia, mientras que las de baja energía son llevadas hacia el centro produciendo un perfil de velocidades donde la velocidad media es mucho más representativa que la misma en un flujo laminar. El perfil de velocidades se ha achatado y pasa de ser una parábola a ser un perfil logarítmico.

En la siguiente figura podemos diferenciar los diferentes perfiles de velocidades que presentan ambos flujos⁴ :

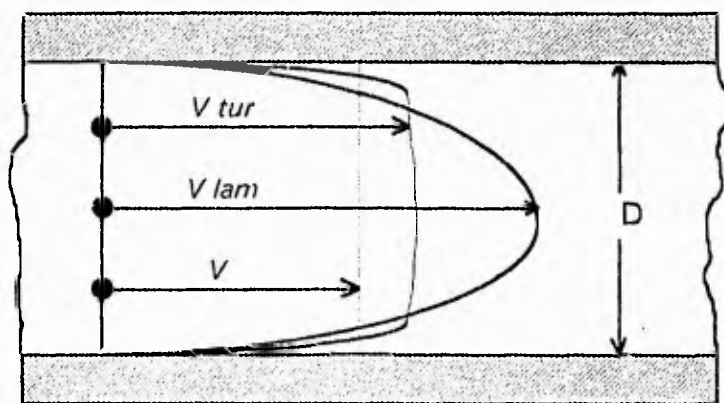


Fig.2 Comparación entre las curvas de flujo turbulento y laminar.

Como se puede observar en la figura, los patrones que se establecen son diferentes, de hecho la velocidad media es más representativa en el flujo turbulento que en el flujo laminar. Ahora, mientras el patrón laminar es mucho más estable, el turbulento varía continuamente con el tiempo. Es necesario llevar un registro continuo en el tiempo para después poder usarse métodos estadísticos. Por esta razón, podemos asemejar algunas de las ecuaciones que se aplicaron en flujo laminar al flujo turbulento. La expresión más significativa de esta relación es la siguiente⁵ :

$$\bar{\tau} = \eta \frac{d\bar{v}}{dy} \quad \text{donde} \quad \begin{array}{l} \bar{\tau} \text{ es el esfuerzo cortante promedio} \\ \eta \text{ se denomina viscosidad de eddy} \end{array}$$

⁴ Referencia 4

⁵ Referencia 4

Podemos ver η es análoga a μ . Analizando de esta manera los modelos turbulentos, se puede eliminar la necesidad de considerar los esfuerzos viscosos instantáneos dentro de los remolinos. Esto se logra gracias a poder expresar el promedio de estos esfuerzos en términos del gradiente de la velocidad media y de η que es el parámetro característico de la turbulencia. Analizando con mayor detalle, podemos ver que la viscosidad característica de un flujo turbulento no es una propiedad del fluido sino que es una característica del movimiento por lo que varía de punto a punto. A continuación se define la viscosidad cinemática para un flujo. Se divide la viscosidad eddy entre la densidad del fluido, entonces obtendremos una característica que es solo del flujo. A continuación se define la viscosidad cinemática para un flujo turbulento:

$$\varepsilon = \frac{\eta}{\rho} \text{ donde } \varepsilon \text{ es la viscosidad cinemática turbulenta.}$$

De esta manera podemos comparar este factor ε con el de la viscosidad molecular cinemática convencional ν . ε debe depender exclusivamente del tamaño de los remolinos y de la velocidad de los mismos que se puede definir como $\sqrt{\bar{v}^2}$. Aunque la medición de la turbulencia es un proceso tedioso, los resultados de las mediciones son sumamente significativos. Estos resultados se pueden representar claramente para un flujo en un tubo de sección circular. Con la siguiente figura podemos representar la variación de la viscosidad cinemática turbulenta a través de la sección mencionada ⁶.

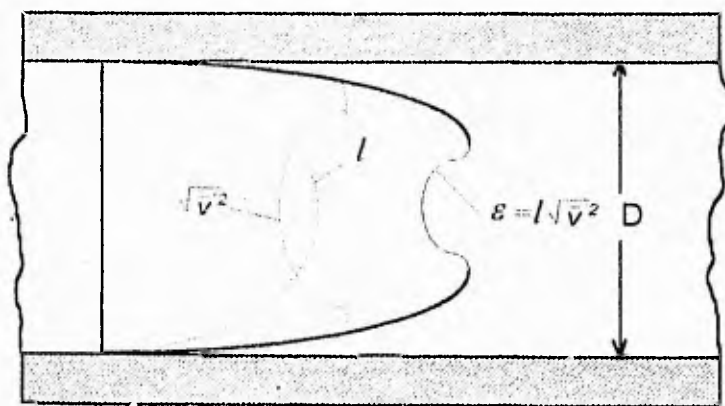


Fig.3 Variación de la viscosidad turbulenta a través de un tubo.

⁶ Referencia 4

Se puede notar que el tamaño de los remolinos l varía desde cero en la frontera hasta un máximo en el centro. La velocidad de fluctuación por el otro lado, es máxima en la frontera y decrece hacia el centro. El producto $\varepsilon = l\sqrt{v'^2}$ es máximo en aproximadamente la mitad del camino entre la frontera y el centro. El mezclado es mucho más fuerte en esta región, teniendo un valor bajo en el centro y casi nulo en la frontera. Esto es sumamente importante no solo en el análisis de la energía de disipación sino que también en problemas de transferencia de calor y suspensión de materiales como polvo en la convección turbulenta. El parámetro ε es una medida directa del índice de mezclado del proceso, y es frecuentemente llamado *coeficiente de difusión*. No hay que olvidar que el tamaño promedio de los remolinos es directamente dependiente de la geometría de las fronteras, la velocidad media de las fluctuaciones para las mismas condiciones geométricas y de la velocidad media del flujo como tal. En otras palabras, el promedio del coeficiente de mezcla para una sección determinada ε_m varía con el diámetro y la velocidad. Dividiendo este coeficiente entre la viscosidad cinemática ν podemos observar una relación con el número de Reynolds:

$$\frac{\varepsilon}{\nu} \approx R$$

En general, podemos ahora afirmar que al aumentar el número de Reynolds crece o se incrementa el estado de mezcla del flujo; también se puede decir que dos estados de flujo turbulento son dinámicamente similares si sus fronteras geométricas son similares y sus números de Reynolds iguales.

Importancia de la Turbulencia en la Mecánica de Fluidos

Dentro de la naturaleza solo en casos muy especiales encontramos flujos completamente estables. En la práctica común diaria, existen siempre fluctuaciones de velocidad que frecuentemente son tales que producen flujos turbulentos. Un flujo turbulento se produce dentro de una tubería, en un canal o en cualquier lugar donde se tenga un fluido en movimiento. Generalmente a velocidades pequeñas el flujo se considera estable y laminar, pero existe una cierta velocidad crítica en la que el flujo se vuelve inestable y turbulento. En el mundo la mayoría de los flujos son turbulentos. La magnitud y estructura de la

turbulencia tienen grandes efectos dentro de la mecánica de fluidos, ya que tienen un enorme efecto en parámetros como el coeficiente de arrastre, el coeficiente de transferencia de calor y el grado de mezclado de varios fluidos.

Las principales áreas donde nos interesa la estructura turbulenta son ⁷ :

- Chorros : para determinar la generación de ruido.
- Paredes de tubos : para determinar la transferencia de calor entre el fluido interno y externo.
- Grado de mezclado : para determinar la eficiencia de la combustión.

Es sumamente importante comprender que la turbulencia influirá directamente en estos fenómenos por lo que es necesario saber cuantificarla en la medición de la velocidad de cierto flujo.

Para entender claramente todo lo que implica la turbulencia y la importancia de poder cuantificarla, a continuación se presentan ciertas definiciones en donde se describen parámetros importantes de la turbulencia:

- *Velocidad Turbulenta*: La diferencia entre la velocidad media y la velocidad instantánea se denomina como velocidad turbulenta y es de suma importancia para la determinación de muchos otros fenómenos involucrados con la turbulencia.
- *Energía Turbulenta*: Es la suma de energías de las velocidades turbulentas y su expresión por unidad de volumen es $1/2 \rho (u^2 + v^2 + w^2)$ donde ρ es la densidad del fluido.
- *Esfuerzos de Reynolds*: En un flujo turbulento, los esfuerzos no son provocados principalmente por la viscosidad, sino que por la transferencia de momentum.

Con los conceptos anteriores, observamos que es de vital importancia conocer claramente la estructura y tamaño de la turbulencia dentro de un fluido en movimiento ya que ésta influirá notablemente en todos los procesos físicos y químicos en los que se involucre el fluido.

⁷ Referencia 5

2.2 MEDICIÓN DE VELOCIDAD EN DUCTOS:

Introducción

La velocidad media de una región pequeña, o puntual, puede ser medida mediante diversos principios físicos:

Cuando un fluido se mueve y sus partículas interactúan entre sí, existe una distribución de velocidades que dependen de las características del flujo y de las condiciones impuestas al flujo. Para poder determinar esta distribución y las velocidades promedio de ciertos flujos se tienen los siguientes métodos de medición ¹:

MÉTODOS DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE FLUJO DE FLUIDOS { DIRECTOS
INDIRECTOS

En ambos métodos, se obtiene:

- A. la velocidad local en una zona del flujo y
- B. una distribución de velocidad aproximada, dependiendo del dispositivo usado

MÉTODOS DIRECTOS:

Proporcionan una medición directa de la velocidad.

Dentro de estos métodos, se tienen:

- Dispositivos mecánicos giratorios:
- anemómetro de copas,
- rotor de Savonius,
- molinete,
- medidor de turbina;
- Ultrasonido;
- Partículas de flotabilidad neutra;
- Sensores de elemento giratorio;

¹ Referencia 6

- Medidor Electromagnético;
- Anemómetro de hilo caliente y Anemómetro Láser Doppler (LDA).

A continuación se describirán algunos de los elementos que se mencionaron anteriormente para poder llegar a la selección adecuada del sistema de medición más apropiado para nuestro experimento, y por supuesto, el que se encuentre disponible en el Laboratorio de Termoenergía.

SENSORES GIRATORIOS:

Se pueden usar en gas o líquido.

El anemómetro de copas y el de Savonius giran siempre en un mismo sentido, sin importar la dirección del flujo. El molinete y el medidor de turbina, por su asimetría, giran en sentido contrario cuando el flujo se invierte. Se conectan a contadores y su desventaja es el tamaño, impidiendo medidas puntuales.

PARTÍCULAS FLOTANTES O CON FLOTABILIDAD NEUTRA.

La velocidad de un flujo se puede estimar introduciendo partículas en él. (virutas en la superficie libre de un canal, burbujas de hidrógeno, o polvo en el caso de los gases). No es un método del todo exacto, y aunque la utilización de partículas flotantes es de mucha utilidad cuando se quiere estudiar el flujo en regiones tan pequeñas que el flujo normal sería alterado y posiblemente desaparecería al introducir un instrumento para medir la velocidad, lo que realmente se mide en este método es la velocidad de la partícula arrastrada por el fluido (que es menor a la del fluido), debido tanto al tamaño de las partículas como a la diferencia de densidades de aquéllas y el flujo.

ANEMÓMETRO DE HILO CALIENTE:

El anemómetro de hilo caliente opera registrando el efecto de enfriamiento que un gas tiene sobre un hilo calentado cuando el fluido pasa chocando con el hilo. El hilo es calentado eléctricamente, y uno puede inferir su temperatura a partir de la resistencia del mismo.

Este instrumento, permite medir la velocidad del aire, y es usado principalmente en zonas donde hay turbulencia y en la zona de la capa límite.

Hay dos tipos de anemómetros de hilo caliente, uno es conocido como de voltaje constante (baja velocidad $<5\text{mm/s}$ o medir temperatura) y otro de temperatura o resistencia constante (es el más usado). El enfriamiento de un hilo calentado eléctricamente, puesto en una corriente de gas que altera la resistencia del hilo, depende de la velocidad del fluido. En el de voltaje constante, tan pronto como el gas empieza a fluir, el hilo caliente se enfría y el voltaje a lo largo del puente de Wheatstone, conectado al hilo, se mantiene constante, y el galvanómetro calibrado muestra una lectura relativa a la velocidad.

La resistencia en la batería a lo largo del puente de Wheatstone es incrementada a un valor tal que el hilo que fue enfriado por la corriente de aire es llevado a su temperatura original. La corriente en el hilo caliente, leído por un amperímetro calibrado, da una medida de la velocidad del aire.

Debido a su alta fragilidad, no es adecuado para líquidos de alta densidad, y tampoco se puede usar en la medición de velocidad en fluidos con partículas.

MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO.

Si se aplica un campo magnético a un fluido conductor, el movimiento del fluido indicará una diferencia de voltaje entre dos electrodos situados dentro o en las proximidades del flujo. Es posible lograr una correcta medición puntual con este aparato pero es muy complicada su calibración ya que depende de muchos factores y propiedades electromagnéticas del fluido. Es posible medir turbulencia ya que si se pueden lograr mediciones puntuales.

ANEMÓMETRO LÁSER-DOPPLER.

En este caso el láser proporciona un haz de luz muy intensa y mono cromática que pasa a través del fluido. Cuando la luz es dispersada por una partícula arrastrada por el flujo, un observador fijo en la tierra puede detectar una variación en la frecuencia de la luz dispersada respecto a la original, por el efecto Doppler. La variación f es proporcional a la velocidad de la partícula. El láser no perturba al flujo en absoluto.

La óptica de emisión divide al láser en dos haces que se cruzan después con un ángulo θ . Las partículas que pasan por esta intersección dispersan la luz de los haces; la luz dispersada pasa, a través de la óptica de recepción, a un foto detector que convierte la luz en señal eléctrica. Un analizador de

señales convierte la frecuencia eléctrica en voltaje que puede ser presentado en un indicador o almacenado en alguna memoria. Si λ es la longitud de onda del láser, y θ es el ángulo de cruce de los rayos, la velocidad medida puntual se puede determinar gracias a la siguiente expresión² :

$$V = \frac{\lambda \Delta f}{2 \text{sen}(\theta/2)}$$

Con el LDA se puede medir tanto en líquidos como en gases siempre que haya partículas en el flujo. En los líquidos normales las impurezas sirven como partículas dispersantes, pero los gases deben ser sembrados. Las ventajas del LDA son que: no perturba el flujo, alta resolución espacial del campo fluido, se obtiene directamente la velocidad independientemente de las demás propiedades del fluido, la señal es lineal con la velocidad, no necesita calibración.

Dentro de los inconvenientes que encontramos en este sistema de medición, podemos mencionar que es muy difícil la colocación adecuada del láser para efectuar las correctas mediciones. Además se requiere de equipo sumamente costoso para poder cuantificar estadísticamente la información que se percibe en los fotodetectores. Otro problema que nos presenta un sistema de este tipo es el hecho de que muchas veces no se cuenta con los alimentadores de partículas adecuadas por lo que es en algunos casos muy difícil lograr tener el trazador adecuado para que los resultados que se obtengan de las mediciones sean los correctos.

Selección del Equipo más apropiado

El primer método que se utilizó para la medición de la velocidad y el más comúnmente usado es el tubo de Pitot. Este dispositivo mide la presión variable del fluido. Sin embargo el tubo de Pitot contiene un fluido que posee cierta inercia a las variaciones de velocidad o mejor dicho las fluctuaciones de velocidad, por lo que no puede seguir al sistema físico adecuadamente y no es posible utilizarlo dentro de nuestro experimento. Por este motivo para medir velocidades turbulentas se ha tenido que crear dispositivos lo suficientemente capaces de seguir la señal y por eso tener poca inercia.

² Referencia 7

Un instrumento diseñado para estos fines es el anemómetro de hilo caliente. Como ya se describió su funcionamiento dentro de este capítulo, el hilo muy fino de 5 micrómetros de diámetro es enfriado por el fluido, y esta pérdida de calor es proporcional al cuadrado de la velocidad. La inercia del sistema es muy baja por lo que fácilmente puede seguir rápidas fluctuaciones como de aproximadamente 50 kHz si se opera a temperatura constante. Este sistema de medición sería útil para nuestro experimento sin embargo sufre de tres principales desventajas que a continuación se presentan³ :

1. Calibración: Los anemómetros de hilo caliente tienen que ser calibrados cada vez que se utilizan ya que su sensibilidad depende de su exacta construcción. Ahora, durante el uso del equipo también se pueden presentar problemas de calibración ya que este se descalibra fácilmente si existen partículas extrañas contaminantes en el fluido.
2. No linealidad: La respuesta de salida de un anemómetro de hilo caliente es proporcional a la $(\text{velocidad})^n$ donde n es aproximadamente igual a 0.5, pero su valor varía con el tipo de fluido, el diámetro del hilo y la velocidad por lo que si las fluctuaciones de velocidad que se tienen que medir son muy grandes el valor de n tiene que determinarse necesariamente. Además, si el valor de n es menor a 1 este crecerá conforme la velocidad y esto traerá complicaciones.
3. La tercera desventaja que presenta un anemómetro de hilo caliente es la fragilidad. Debido a que el hilo caliente es tan delgado es muy posible que llegue a romperse. Si se toca al hilo con un objeto sólido este se romperá. Otro problema es que si el fluido contiene alguna partícula extraña y más grande de lo normal chocará con el hilo y también lo romperá. Este problema se presenta principalmente cuando se utiliza el sistema en flujos de alta velocidad.

Los anemómetros de hilo caliente también sufren de otras desventajas como la ambigüedad en la dirección del flujo, el cual es impredecible en los fluidos no-Newtonianos. También existe flujo de calor entre el hilo y el cable donde se soporta por lo que se pierde exactitud en la medición.

Por todas estas razones, es necesario tener un sistema de medición que no presente estas dificultades. Se requiere de un sistema absoluto sin necesidad

³ Referencia 5

de calibración, donde no se tenga contacto entre el elemento de medición y el fluido, y que sea lineal.

Todas estas características las tiene un sistema de medición láser Doppler, con el que podemos llevar a cabo las mediciones necesarias para nuestro trabajo.

En el siguiente subtema se hablará más a fondo de la anemometría láser Doppler, ya que el sistema que más se adapta para nuestras necesidades, además que se tiene la fortuna de tenerlo en el Laboratorio de Térmica de la facultad. El láser que se usó fue de Helio-Neon, y se montó en una mesa de madera rígida especialmente fabricada para el experimento. El mezclador helicoidal se colocó sobre una pequeña mesa de tres coordenadas. A esta mesita de coordenadas se le implementó la tercera coordenada para poder medir de una manera más adecuada. En el capítulo del diseño del experimento se podrán ver los detalles de estos equipos así como la descripción del experimento y su funcionamiento.

2.3 ANEMOMETRÍA LÁSER-DOPPLER

Introducción

A lo largo de muchos años, la mecánica de fluidos experimental ha utilizado sistemas de medición mecánicos para obtener información sobre la velocidad del fluido. Sistemas que miden la presión total junto con sistemas que miden la presión estática, han hecho posible la determinación de la velocidad media. Otros sistemas como el anemómetro de hilo caliente miden la velocidad instantánea dentro de un flujo, por lo que se puede determinar la velocidad media, y las correlaciones correspondientes. Sin lugar a duda los sistemas mecánicos seguirán siendo de gran importancia para la experimentación dentro de la mecánica de fluidos pero existen diversas limitaciones que hacen necesario la utilización de nuevas formas de medir. Por esta razón, se requiere de utilizar métodos que no alteren el flujo para así realizar mediciones adecuadas. Los métodos ópticos son una alternativa muy atractiva ya que ofrecen grandes ventajas para ciertas mediciones en particular.

El método óptico de medición conocido como el anemómetro laser-Doppler, permite la medición instantánea y local de la velocidad del flujo, gracias al uso de partículas suspendidas que no alteran el mismo. Es importante escoger las partículas adecuadas para la correcta medición de los parámetros de velocidad. La gran importancia de los métodos que no alteran las características del flujo es de particular importancia para flujos con recirculación y en ductos muy pequeños donde es imposible usar algún dispositivo físico. El anemómetro de hilo caliente es de gran utilidad para el estudio de las estructuras de los flujos turbulentos pero su aplicación se encuentra restringida debido a las propiedades del flujo como lo son la baja temperatura, baja velocidad y poca turbulencia. El anemómetro Lasser-Doppler, no tiene estos problemas aunque puede presentar muchos otros, pero lo importante es que no dependemos del tipo de flujo.

Historia y Principio de funcionamiento

En cuanto a la historia de este sistema de medición, podemos ver que el concepto fundamental de la anemometría láser es el del efecto Doppler utilizado para medir la velocidad de los cuerpos celestiales. El fundamento de este principio involucra la frecuencia de radiación que se recibe desde un objeto en movimiento a un detector estacionario. Este principio es de gran

utilidad en la astronomía y la comunicación. La ecuación que nos relaciona la variación de la frecuencia medida con la velocidad del cuerpo instantánea se deriva de la teoría de Doppler relevante a la radiación y a la teoría de ondas y tiene la siguiente forma¹ :

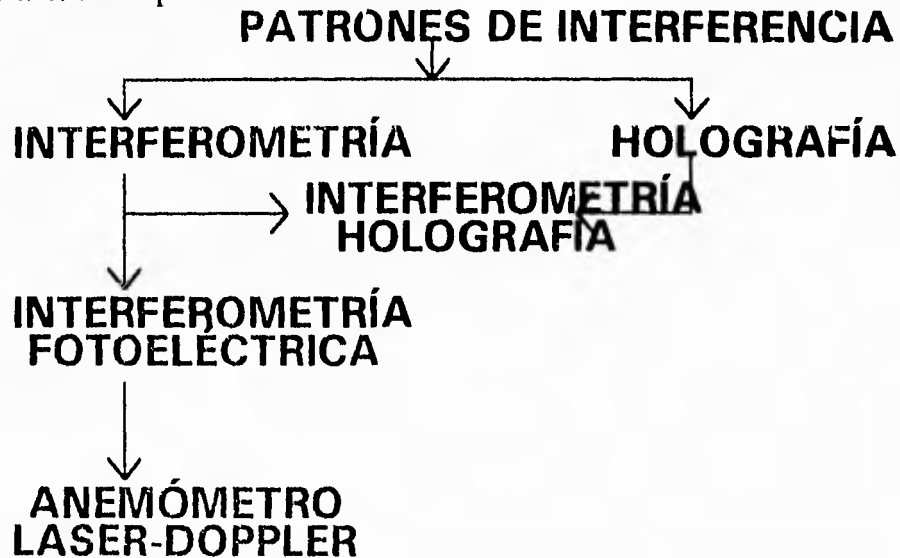
$$v_D = 2 \frac{v_0}{c} \hat{U} \sin \varphi$$

expresando la relación lineal que existe entre la frecuencia instantánea v_D y la velocidad instantánea U . φ representa el ángulo entre rayos y v_0 , la frecuencia de referencia. Esta relación lineal es particularmente interesante, ya que en contraste con la medición con anemómetro de hilo caliente si se puede lograr mediciones correctas en zonas de alta turbulencia. La expresión anterior se describirá posteriormente en el capítulo mediante el modelo de franjas. Con la invención del láser en 1960 era de esperarse que se buscarán aplicaciones para este invento. Se empezó a considerar el hecho de medir la velocidad de un material por medio del efecto Doppler. Este efecto puede ser utilizado para medir la velocidad de un objeto que dispersa la luz. Si se utiliza una fuente de luz para enviarla a un cuerpo en movimiento, el cuerpo ve la luz a una frecuencia mayor a la frecuencia con la que se emite la luz por lo que al reflejarla esta regresa con la misma frecuencia con la que el cuerpo la recibe. De esta manera un observador situado en la fuente de luz, verá la luz que regresa a una frecuencia aún mayor ya que el cuerpo viaja hacia él. La fracción donde podemos ver los cambios de frecuencia es aproximadamente $2v/c$ donde v es la velocidad del cuerpo en movimiento y c es la velocidad de la luz. La primera aplicación de la anemometría laser-Doppler se presentó en el año de 1964 por Yeh y Cummings. Estos autores midieron un flujo totalmente desarrollado laminar en una tubería con agua. Como sabemos existen varias maneras para trabajar con un anemómetro de este tipo y que son varios los componentes que trabajan en conjunto para poder obtener resultados. El método más común y el de estudio para nuestro caso particular es el de rayo Dual o sistema de franjas que usa dos rayos de igual intensidad intersectándose para producir un patrón de franjas mismo que es nuestro volumen de control. Cuando una partícula circula a través de las franjas, los cambios de la intensidad de la luz dispersada por la partícula son registrados por el fotodetector donde se genera algún tipo de señal proporcional a la velocidad.

¹ Referencia 9

Los primeros en trabajar con este sistema fueron Durst and Whitelaw en el año de 1971.

Dentro de los sistemas de medición ópticos podemos distinguir dos grandes grupos. Los primeros son aquellos que estudian el movimiento por medio de la generación de imágenes, los segundos son aquellos que lo hacen por medio de patrones de interferencia como el laser-Doppler. A continuación se presenta una figura donde podemos ver que diferentes patrones de interferencia existen para la medición:²



De esta manera las técnicas ópticas de medición por medio de patrones de interferencia nos permiten determinar la velocidad de cierta partícula. Esto se logra midiendo el tiempo que le toma a la partícula cruzar la zona de intersección de franjas conocida. Este método, que puede ser usado en muchas formas, se conoce como Laser-Doppler y será el método de estudio para nuestro caso. En general, los patrones de interferencia se generan de tres maneras diferentes, como lo son el dual, el de referencia y el de los dos rayos dispersados. Cuando dos rayos se intersectan, se genera el patrón de franjas que puede ser real o virtual dependiendo si los rayos se cruzan o solo las ondas de dispersión de luz se mezclan.

Dentro de los grandes problemas que presenta un sistema de medición óptico con rayo láser es el hecho de alinear correctamente el láser para efectuar mediciones precisas. Existen diversos tipos de arreglos para efectuar las mediciones, pero sin lugar a duda el sistema de alineación automática es el más utilizado para medir en flujos. El alineamiento del láser se realiza dividiendo el

² Referencia 9

rayo principal utilizando lentes, por lo que ahora se tendrán dos rayos que más tarde se reunirán en el punto de medición. Este sistema se denomina autoalineante, ya que un solo lente enfoca los dos rayos en el punto de medición por lo que se enfocan en el mismo volumen. Así, la alineación es automática y es independiente de cambios producidos por vibración o cambios térmicos. Además ambos rayos son equivalentes y son recogidos por el mismo lente hacia el fotodetector. La señal es mucho más fuerte que en cualquier otro caso además de que siempre se encuentra alineada. Finalmente, se puede utilizar un simple fotodiodo para detectar la luz en lugar de fotomultiplicadores de otros sistemas. Lo anterior, se puede resumir claramente en la figura que se presenta a continuación con sus respectivas partes³ :

- Una fuente de luz, que siempre es láser.
- Un arreglo óptico para dirigir, transmitir y colectar los rayos.
- Un fotodetector que produce una señal dependiendo de la intensidad de luz que recibe.
- Un procesador de señal para poder colectar la información y darle sentido a la misma.

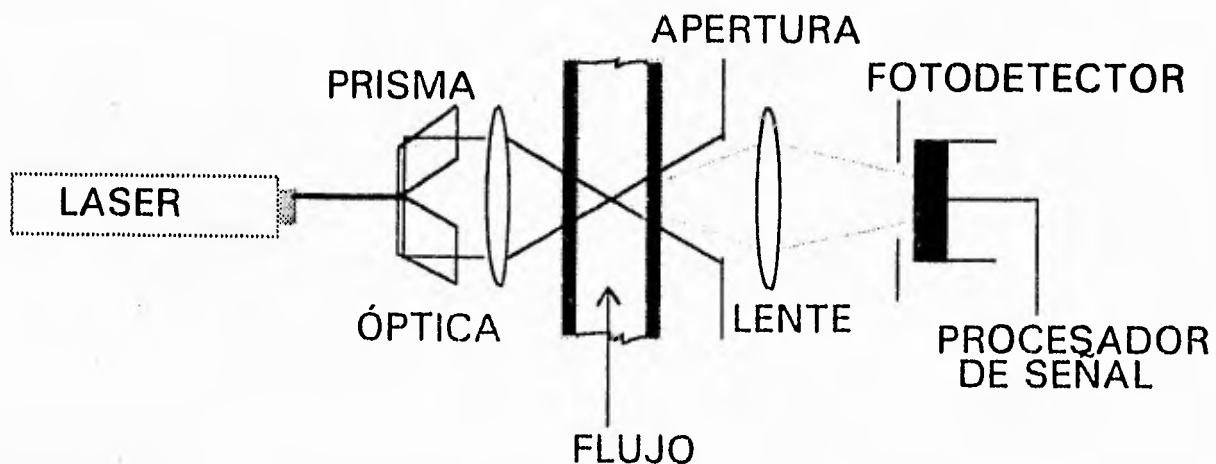


figura 2

El láser es una fuente de luz coherente de apropiada intensidad, como se puede ver en la figura 2. El rayo se parte en dos en el prisma para poder

³ Referencia 10

cruzarlo después y poder generar el patrón de interferencia necesario. Este punto de cruce generador de la interferencia, es observado por un sistema de colección de luz donde se puede obtener una imagen gracias al uso del fotodetector. El fotodetector convierte la señal óptica a una señal eléctrica, la cual es procesada por un sistema apropiado de procesamiento de señales. De esta manera la señal procesada llega a una computadora donde se pueden obtener los resultados que se desean.

Particularmente en la zona de medición que es en donde se cruzan los dos rayos, se genera un modelo de franjas. Este modelo se produce por la intersección de dos ondas de luz coherentes que al chocar generan dentro de cierto volumen una serie de franjas. Una partícula que atraviesa este volumen con una cierta velocidad cubrirá alternativamente tanto la parte brillante como la oscura del modelo de franjas. Cuando esta partícula es observada desde cualquier dirección, se producirá una fluctuación senoidal cuya frecuencia será proporcional al distanciamiento de las franjas y a la velocidad perpendicular a las franjas. A continuación se presenta un esquema en donde se puede observar el modelo de franjas⁴ :

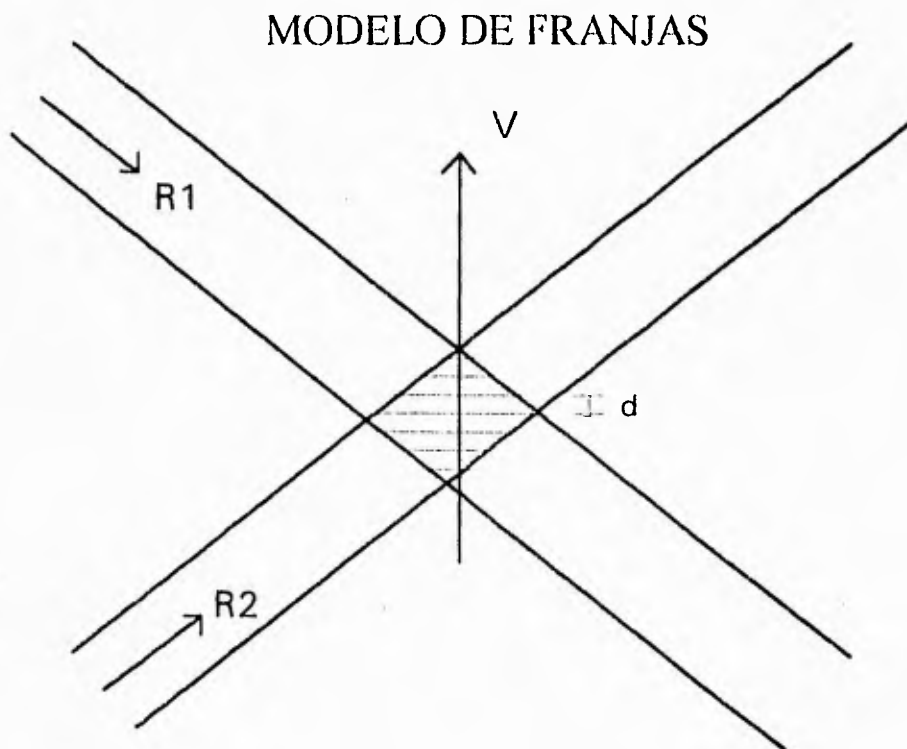


figura 3

⁴ Referencia 5

De la figura 3 se desprende⁵ :

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha} \quad \text{donde } \begin{array}{l} d = \text{distancia entre franjas} \\ \lambda = \text{Longitud de onda del laser} \\ \alpha = \text{Ángulo formado entre rayos} \end{array}$$

y el tiempo T que toma la partícula para viajar la distancia d:

$$T = \frac{d}{V}$$

y la frecuencia ν_d de la señal es ⁶ :

$$\frac{1}{T} = \nu_d = \frac{2V}{\lambda} \sin \alpha$$

La expresión anterior ilustra claramente el efecto Doppler, donde se puede observar la relación que existe entre la frecuencia y la velocidad de la partícula. Además podemos notar claramente que la frecuencia es independiente a la dirección del observador.

Partículas en anemometría láser

Cuando se mide un flujo turbulento con un sistema laser-Doppler es necesario utilizar partículas que no tengan influencia en la turbulencia del flujo, pero que si lo representen en su totalidad. Estos dos criterios nos llevan a buscar una selección de partículas y de concentración adecuada. Si el tamaño

⁵ Referencia 5

⁶ Idem.

de la partícula excede el valor adecuado, se pueden utilizar ciertas correlaciones para así lograr un espectro adecuado de la turbulencia⁷.

La turbulencia de un fluido puede ser investigada experimentalmente midiendo los movimientos de partículas sólidas dentro del fluido. La medición por medio del uso de un dispositivo láser, permite la medición de la velocidad por medio de la dispersión de luz, por lo que así se puede determinar el movimiento turbulento. En la operación de anemómetros láser, estos requieren de ciertas propiedades de las partículas así como los sistemas que complementan el equipo. Es importante que las partículas sean capaces de seguir el movimiento turbulento completamente y que además todas las partículas en conjunto no afecten de ninguna manera el desarrollo del flujo. Estas restricciones o condiciones imponen un cierto tamaño de partícula así como una cierta concentración. Aunque mucha investigación se ha desarrollado en el campo del tamaño y concentración de partículas no se ha podido determinar nada seguro sobre la influencia de estos cuerpos sólidos dentro del flujo turbulento. Alguna de las cosas que se ha encontrado es que las partículas experimentan una fuerza de arrastre lo que provoca una reducción en la turbulencia. Generalmente, como se mencionó anteriormente no existe ninguna teoría válida o cálculo relativo a la variación de la turbulencia dependiendo del contenido de partículas, aunque se han intentado desarrollar ciertos estudios experimentales en ciertos flujos con condiciones y restricciones muy bien definidas.

Para la definición de la partícula adecuada, podemos decir, que depende principalmente de varias propiedades⁸. Dentro de estas encontramos la porosidad, la densidad de la partícula en comparación con la del fluido, la velocidad del sonido dentro del fluido, el cambio de la velocidad de las partículas en relación a las partículas del propio fluido, y la viscosidad cinemática principalmente.

El principal problema en partículas es cuando estas son escasas y de un diámetro muy pequeño por lo que la refracción de luz no es lo suficientemente adecuada para poder llevar a resultados adecuados. Mientras más pequeñas sean las partículas los problemas que se presentan son mucho mayores. En el caso contrario cuando estas son grandes se deben de usar correlaciones para corregir las mediciones experimentales.

El sistema de medición láser -Doppler es sumamente importante para la mecánica de fluidos ya que a diferencia de los métodos comunes de determinación de velocidades, el sistema óptico no requiere de insertar algún

⁷ Referencia 11

⁸ Referencia 11

objeto dentro del flujo, por lo que no se perturba éste. También es importante saber que el sistema requiere de partículas adecuadas para la clara dispersión de la luz. Estas partículas deben elegirse adecuadamente para que no nos presenten resultados inadecuados. El Sistema de medición de velocidad funcionará adecuadamente si existen centros de dispersión de luz adecuados. Por esta razón, deberán agregarse partículas especiales a aquellos flujos donde por naturaleza propia la luz no se refleje de manera adecuada. Las partículas seleccionadas pueden variar en tamaño. Pueden ser desde fracciones de micrómetro de diámetro hasta varios micrómetros de diámetro, para un adecuado funcionamiento. Partículas demasiado pequeñas no producirán el suficiente reflejo necesario mientras que las partículas muy grandes bloquearán la luz impidiendo el adecuado funcionamiento.

El sistema es particularmente útil para medir el flujo másico, la velocidad y los cambios que ella presente y la medición de la velocidad instantánea con sus correlaciones.

En resumen, la operación de un velocímetro láser depende de un arreglo óptico, un detector, estadística de partículas y finalmente un acercamiento a una señal electrónica para procesar. Es muy importante recalcar, que un velocímetro láser no se mide la velocidad del fluido, se mide solo la velocidad de partículas contaminantes del flujo que pueden o no seguir la trayectoria del propio fluido.

Ventajas del sistema Láser Doppler.

Dentro de las ventajas que ofrece el sistema láser Doppler es el hecho de que muchos de los instrumentos comunes como rotámetros y venturis requieren de calibración para su correcto funcionamiento, en cambio nuestro sistema solo requerirá de buena señal y de partículas adecuadas pero no es necesario calibrarlo. Ahora si hablamos de desventajas podemos decir que algunos sistemas como el anemómetro de hilo caliente, ofrecen una respuesta inmediata de medición. El laser-Doppler tiene la propiedad de medir velocidades locales e instantáneas, por lo que para conocer el gasto y la velocidad media de un flujo completamente desarrollado lo único que se requiere es integrar para el perfil que se tiene.

Otra gran ventaja que podemos encontrar es la rápida variación de respuesta que ofrece el sistema a cambios de velocidad muy rápidos. La sensibilidad a cambios de velocidad tiene una clara aplicación, esto es, la

inmediata respuesta o flujos de gas inesperados como los que se pueden presentar en ductos o minas.

Finalmente, la tercera gran ventaja que ofrece el sistema de medición laser-Doppler es la gran aplicación en instrumentos de diagnóstico en máquinas como las turbinas de vapor y gas, máquinas reciprocantes y otros equipos donde se requiera de medir velocidades instantáneas para lograr las correlaciones importantes⁹. Los flujos que requieren de este tipo de mediciones son en especial los flujos turbulentos donde las correlaciones que se logran ayudan significativamente a la resolución de los modelos turbulentos establecidos, ya que en los flujos laminares las soluciones son mucho más sencillas y no requieren de este tipo de ayuda. Para estudiar los flujos turbulentos se requiere de modelos que de alguna manera puedan representar lo que sucede físicamente. Para este estudio se utilizan en particular las ecuaciones de Navier-Stokes que hoy en día gracias a la ayuda de las computadoras se puede llegar a resultados importantes. Dentro de el capítulo de turbulencia se podrán observar estos modelos matemáticos que se han mencionado.

Después de haber revisado las diferentes alternativas que nos ofrecen los diferentes equipos de medición de velocidad, podemos afirmar que el sistema más apto para desarrollar este trabajo es el anemómetro laser-Doppler. Las ventajas que este nos ofrece son circunstanciales además de que se cuenta con el equipo necesario para utilizar correctamente el láser. La medición de la turbulencia que se genera en el mezclador helicoidal será el objetivo principal a lograr, por lo que la medición de velocidades localizadas específicamente en ciertos puntos y las rápidas variaciones que estas presentarán nos empujan a utilizar todo el sistema laser-Doppler para así poder lograr las correlaciones necesarias y determinar los perfiles de velocidades que se presentarán. Utilizando el anemómetro láser se podrán medir dos de las tres componentes de la velocidad absoluta del fluido, por lo que se necesitará de el uso de una computadora para la resolución de los modelos turbulentos que se tienen establecidos para este tipo de tubos.

Es muy importante aclarar que el objetivo de esta tesis no es la anemometría laser-Doppler por lo que no se describirá con gran detalle el sistema de medición con sus componentes principales que ya fueron mencionados. En capítulos posteriores se describirá el funcionamiento del sistema así como los parámetros con los que se trabajó para lograr los resultados deseados. También cabe aclarar que aunque efectivamente la

⁹ Referencia 5

anemometría no es el objetivo de este trabajo se ha tratado de exponer de una manera sencilla, tratando de abarcar los puntos más importantes de dicho sistema y de los componentes que le rodean.

Para realizar todos los experimentos se utilizará el equipo del laboratorio de la facultad de ingeniería dentro de su departamento de termoenergía, donde se cuenta con un sistema completo desde el cañón láser hasta la computadora encargada de dar los resultados en la forma que se requieren. Es importante mencionar que el equipo con el que cuenta el laboratorio contiene tanto el sistema de medición completo laser-Doppler, así como el dispositivo posicionador en tres dimensiones que se requiere para poder mover el objeto en todos los sentidos que se desee.

Posicionadores

Para medir un perfil de velocidades con un sistema laser-Doppler es necesario contar con algún mecanismo que sea capaz de poder mover el punto de medición. Cuando se mide dentro de grandes tuberías o lugares donde el flujo sea muy grande es necesario utilizar un sistema mecánico que mueva todo el sistema láser. En otras palabras, sería imposible estar moviendo un ducto o una tubería de 20 pulgadas de radio por lo que es imprescindible que el sistema mueva el cañón láser y el fotomultiplicador sin olvidar la óptica. El sistema debe de tener la capacidad de moverse en conjunto sin perder su alineación para así poder seguir midiendo adecuadamente.

En el otro caso, podemos tener un sistema fijo donde el lugar donde se efectúa la medición es inmóvil. En este caso el encargado de moverse es el dispositivo donde se está produciendo el flujo.

En ambos casos, es importante cuidar que siempre se mida en la zona donde se produce el patrón de franjas y se debe de cuidar de manera importante que la señal siempre sea buena. La señal será buena siempre y cuando se use la partícula adecuada para la dispersión de luz. Existen diversas formas de introducir partículas al flujo por lo que si se cuidan los detalles de concentración, tamaño, densidad, capacidad de seguimiento entre otros, la señal se presentará en forma adecuada.

2.4 ANÁLISIS DIMENSIONAL

Introducción

Uno de los objetivos del análisis dimensional es poder resolver problemas prácticos de diseño de la mecánica de fluidos. Gracias a la agrupación de cantidades significativas en parámetros adimensionales es posible reducir el número de variables que aparecen en los problemas físicos y hacer este resultado compacto. Por esta razón utilizaremos el análisis dimensional para resolver el problema de nuestros mezcladores helicoidales. Los parámetros adimensionales profundizan de manera significativa nuestra comprensión de los fenómenos del flujo de fluidos¹. Un número adimensional es de gran utilidad ya que al no tener unidades, este se puede usar para la generalidad de los problemas en los que las variables físicas involucradas en el parámetro adimensional participen. La consecuencia de tal generalización es múltiple, ya que ahora se puede describir el fenómeno en su totalidad sin estar restringido a un experimento especializado en particular. En resumen podemos decir que el análisis adimensional es de suma utilidad en los problemas de semejanza dentro de la mecánica de fluidos.

Dentro de nuestro problema particular, podemos ver que las variables que deben de ser consideradas para el análisis dimensional deben de ser las siguientes:

Variables Importantes:
$D_i \Rightarrow$ Diámetro del tubo helicoidal [m].
$D_e \Rightarrow$ Diámetro de las espiras [m].
$L \Rightarrow$ Longitud del tubo [m].
$h \Rightarrow$ Altura del tubo [m].
$N \Rightarrow$ Número de vueltas [rad].
$\rho \Rightarrow$ Densidad del fluido [kg/m^3].
$\mu \Rightarrow$ Viscosidad del fluido [$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}$].
$v \Rightarrow$ Velocidad promedio [m/s].
$v' \Rightarrow$ fluctuación en la velocidad [m/s].
$\Delta P \Rightarrow$ Caída de presión [Pa].

¹ Referencia 8

Desarrollo

Con la determinación de las variables importantes del problema físico podemos utilizar el Teorema Π de Buckingham² para lograr obtener los parámetros adimensionales.

Primeramente se deben determinar el número de variables físicas (n), después se debe determinar el número de unidades fundamentales (r) para que entonces existan $(n-r)$ grupos adimensionales en nuestro problema. Para nuestro caso en particular:

$n = 10$ variables.
$r = 3$ dimensiones.

por lo que se tendrán 7 parámetros adimensionales. El siguiente paso es seleccionar las 3 variables que se repetirán en todos los grupos adimensionales. Es necesario escoger variables que contengan en su conjunto las 3 unidades fundamentales y por supuesto se deberá verificar que sean linealmente independientes entre sí. Como recomendación es bueno escoger variables muy generales y de todos tipos como geométricas, cinemáticas, dinámicas y térmicas si es que existen. A continuación se presenta una matriz donde se encuentran en los renglones las variables seleccionadas y en las columnas las unidades fundamentales.

	L	t	m
\bar{v}	1	-1	0
μ	1	-1	-1
Di	1	0	0

Det = 1 por lo que son linealmente independientes

² Referencia 8

De esta manera si podemos utilizar estas variables seleccionadas como variables de repetición los grupos adimensionales que se formarán para el análisis de nuestros mezcladores serán los siguientes:

$$\Pi_1 = \bar{v}^a \mu^b Di^c De^1 = [L^1 t^{-1}]^a [m^1 t^{-1} L^{-1}]^b [L^1]^c [L^1] = m^0 L^0 t^0$$

Con las unidades tres fundamentales se formulan las ecuaciones siguientes de donde se depende:

$$\text{Tiempo } t = -a-b=0$$

$$\text{Masa } m = b=0$$

$$\text{Longitud } L = a-b+c+1=0.$$

$$\text{Donde resolviendo el sistema : } \Pi_1 = \frac{De}{Di} .$$

De igual manera Π_2 y Π_3 se obtienen de igual manera ya que las dimensiones son las mismas y obteniendose:

$$\Pi_2 = \frac{L}{Di} \text{ y } \Pi_3 = \frac{h}{Di}$$

El grupo Π_4 es un grupo adimensional que se forma exclusivamente con la variable n ya que esta por si sola es adimensional, lo que nos resulta un número adimensional de la siguiente manera:

$$\Pi_4 = N$$

En el caso de Π_5 se tiene la siguiente ecuación:

$$\Pi_5 = \bar{v}^a \mu^b Di^c v'^1 = [L^1 t^{-1}]^a [m^1 t^{-1} L^{-1}]^b [L^1]^c [L^1 t^{-1}] = m^0 L^0 t^0$$

y su resolución:

$$\text{Tiempo } t = -a-b-1=0$$

$$\text{Masa } m = b=0$$

$$\text{Longitud } L = a-b+c+1=0.$$

$$\Pi_5 = \frac{v'}{v}$$

Para el grupo Π_6 relacionamos la densidad teniendo:

$$\Pi_6 = \bar{v}^a \mu^b Di^c \rho^1 = [L^1 t^{-1}]^a [m^1 L^{-1} t^{-1}]^b [L^1]^c [m^1 L^{-3}] = m^0 L^0 t^0$$

$$\text{Tiempo } t = -a-b=0$$

$$\text{Masa } m = b+1=0$$

$$\text{Longitud } L = a-b+c-3=0.$$

$$\Pi_6 = \frac{\mu}{v\rho Di}$$

Para el grupo Π_7 relacionamos la diferencia de presiones teniendo:

$$\Pi_7 = \bar{v}^a \mu^b Di^c \Delta P^1 = [L^1 t^{-1}]^a [m^1 t^{-1} L^{-1}]^b [L^1]^c [m^1 L^{-1} t^{-2}] = m^0 L^0 t^0$$

$$\text{Tiempo } t = -a-b-2=0$$

$$\text{Masa } m = b+1=0$$

$$\text{Longitud } L = a-b+c-1=0.$$

Por lo que el número adimensional que resulta es:

$$\Pi_7 = \frac{\Delta P D_i}{v \mu}$$

En resumen los números adimensionales obtenidos son:

- $\Pi_1 = \frac{D_e}{D_i}$ Relación entre el diámetro de las espiras y el diámetro del tubo.
- $\Pi_2 = \frac{L}{D_i}$ Relación entre el largo del tubo y su diámetro.
- $\Pi_3 = \frac{h}{D_i}$ Rugosidad relativa.
- $\Pi_4 = N$ Se relaciona el número de vueltas con el diámetro del tubo.
- $\Pi_5 = \frac{v'}{v}$ Relación entre la velocidad de fluctuación y la velocidad media.
- $\Pi_6 = \frac{\mu}{\rho v D_i}$ El número de Reynolds
- $\Pi_7 = \frac{\Delta P D_i}{v \mu}$ Relación entre la caída de presión, diámetro con la velocidad y viscosidad.

Finalmente Es posible reducir estos parámetros multiplicando el número adimensional Π_2 con el Π_7 y obteniendo el siguiente número:

$$\Pi_{2-7} = \frac{\Delta P D_i^2}{\nu \mu L}$$

Al que bautizaremos como el número de Fernández.

La función resultante del análisis dimensional es la siguiente expresión:

$$\frac{v'}{v} = f \left\{ \text{Re}, \frac{D_i^2 \Delta P}{\mu \nu L}, N, \frac{D_e}{D_i}, \frac{h}{D_i} \right\}$$

Cabe aclarar que este análisis adimensional, es el resultado de muchos intentos donde se fueron probando diferentes variables y diferentes formas de colocarlas para así lograr encontrar aquellas que fuesen las más significativas y que representaran de mejor manera el problema. En los siguientes capítulos se encontrará la aplicación del análisis adimensional y los datos que se utilizaron en las expresiones, así como los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Introducción

Para el desarrollo de este trabajo fué necesario contar con una serie de elementos que en conjunto formaron el sistema deseado. Como se ha descrito en capítulos anteriores nuestro experimento incluye un equipo completo de anemometría laser-Doppler. Además se requiere de un compresor, un alimentador de partículas, válvulas y reguladores de presión, mangueras de alimentación y para purgar, un micromanómetro diferencial, conexiones y por supuesto los diferentes tubos helicoidales con los que se trabajó. En el transcurso de este capítulo se describirá a detalle el funcionamiento de todo el sistema con el que se contó.

En principio, se pensó realizar esta tesis con un cañón láser que contaba por una parte con un haz verde, y a 90 grados con un haz azul. Este sistema producía un patrón de franjas cuadrículado que en determinado momento y con un equipo complementario adecuado se podría medir velocidad en dos direcciones. Para esto, se construyeron una mesa de madera sumamente firme para evitar movimientos grandes en donde se colocó este cañón láser. Posteriormente, al ser el láser un sistema fijo, se necesitó diseñar y construir un sistema para el movimiento del dispositivo en donde se mediría. En otras palabras, se tenía que construir una pequeña mesita de coordenadas para poder mover los tubos helicoidales en las tres dimensiones. Tanto la mesa de madera, como la mesa de posicionamiento se construyeron y se encuentran dentro del laboratorio. Desafortunadamente, no se pudieron utilizar ya que los excitadores de los fotomultiplicadores del cañón láser no funcionaban e introducían a la señal una enorme cantidad de ruido por lo que se tuvieron que buscar otras alternativas.

Dentro del laboratorio de Termoenergía se cuenta con un láser montado en todo un sistema complejo para el desarrollo de la anemometría láser. De esta manera, se utilizarón estas instalaciones que se encontraban funcionando adecuadamente. Cabe aclarar que en este caso se fijó el tubo helicoidal y lo que se movía era todo el sistema, es decir, el rayo láser alineado con la óptica y el fotomultiplicador.

El principal objetivo de nuestro experimento es medir el perfil de velocidades a la salida del dispositivo helicoidal y por supuesto observar los

niveles de turbulencia que presenta dicho flujo. Para esto se montó el experimento en el láser móvil de la facultad y se fijo el tubo en la estructura fija del sistema.

Presentación del Modelo Experimental

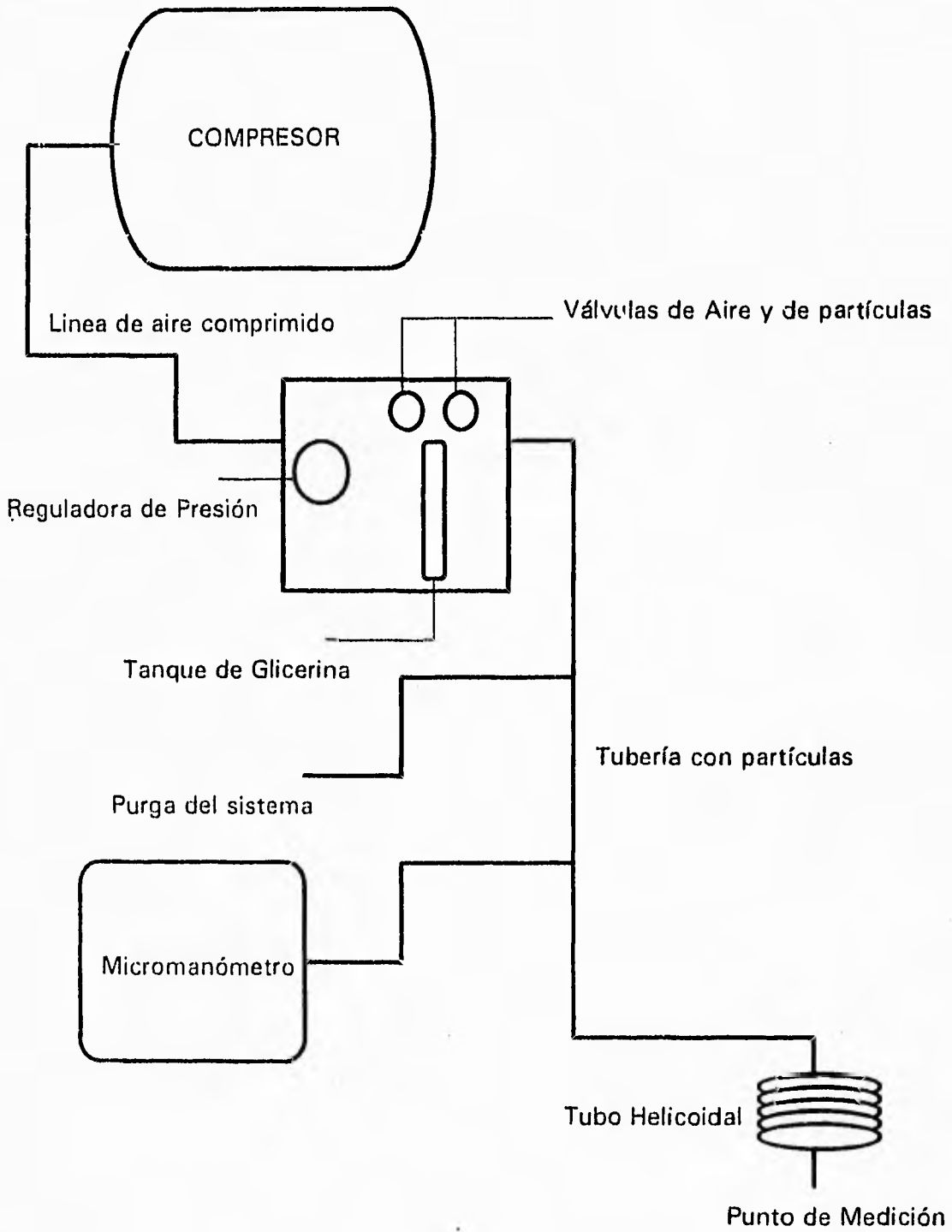
Como se mencionó en la introducción el sistema cuenta con una serie de componentes interrelacionados. Todos estos componentes tienen como fin lograr medir el perfil de velocidades y la turbulencia en la salida de los diferentes tubos. A continuación se describe el sistema y el funcionamiento del mismo así como la presentación de un diagrama donde se ilustrará esto de mejor manera para facilitar la comprensión.

Dentro de la parte del desarrollo del flujo, se utilizó un compresor existente en el laboratorio que nos proporcionaba aire a 10 bares, que era presión suficiente para fines del trabajo. Este se conectó por medio de una tubería ya existente y después por medio de una manguera flexible hasta el alimentador de partículas.

Dentro del alimentador de partículas se tiene una válvula reguladora de presión misma que junto con las válvulas de aire y partículas del propio alimentador nos permitía regular el gasto de manera adecuada. Como podemos ver, el alimentador de partículas es algo sumamente importante ya que por un lado llega aire a presión y por el otro tenemos un recipiente con glicerina que será atomizada gracias a la presión del aire y a una tobera. El alimentador tiene dos válvulas que se encargan de combinar nuestra mezcla aire glicerina atomizada. La glicerina es sumamente importante ya que será la encargada de poder reflejar la luz para que el sistema laser-Doppler funcione adecuadamente.

Por el otro lado, tenemos un rayo láser que pasa por una óptica donde se divide y después se encuentra en la zona de medición para posteriormente llegar al fotomultiplicador. Como se menciona en el capítulo 3, se produce una señal que se amplifica y se lleva a una computadora donde se obtiene el resultado final. A la salida del alimentador, tenemos dos conexiones en Y, la primera fué para purgar ya que a veces se acumulaba glicerina dentro de la manguera y la segunda para sacar una manguera para poder utilizar el micromanómetro que nos indicaba la presión con que la mezcla era impulsada por el tubo helicoidal.

A continuación se presenta el diagrama de la instalación del experimento realizado:



Este es el esquema general de la instalación donde podemos decir que en el punto de medición las partículas de glicerina siguen al fluido y nos representan su movimiento. No se representó el sistema Laser-Doppler ya que dentro del capítulo 2 se encuentra claramente representado en la figura 2.

Desarrollo del Experimento

Para iniciar el proceso de medición era necesario lograr una alimentación de partículas adecuada y un gasto constante a lo largo de toda la fase de medición para dicho gasto. Para lograr este propósito, se alimentaba con partículas y después se bajaba o aumentaba el gasto con la válvula reguladora. El micromanómetro diferencial nos indicaba la presión con la que el fluido era impulsado por lo que en este dispositivo se fijaron los tres parámetros de gasto manejados para cada tubo. Estos gastos fueron 30, 40 y 50 mm de agua para cada uno de los 5 tubos diferentes. Una vez fijado el gasto y la alimentación de partículas era necesario colocar nuestro punto de medición en el centro del tubo para después poder mover el láser hacia los diferentes puntos. Se debía colocar el cruce de los rayos en el centro geométrico de la circunferencia de salida y justo a la salida del tubo ya que es nuestra zona de interés. Cuando se tenía identificado el centro y el gasto constante con buena alimentación de partículas se procedió a la medición por computadora. Como sabemos la señal que se produce, es generada por el fotomultiplicador que es excitado por un alto voltaje por lo que es necesario verificar el nivel de excitación que en este caso se colocó al máximo. Después se ajustaban los filtros hasta que la señal con la que se contaba en la memoria digital fuese clara y continua para lograr mediciones correctas y rápidas.

Es muy importante tener en mente ciertas consideraciones importantes y básicas para el desarrollo de este trabajo.

Primero hay que aclarar que se visualizó el flujo y después de esto se llegó a la conclusión de que la velocidad importante y representativa del flujo era la velocidad axial por lo que la velocidad que se midió en todos los experimentos fue la misma.

Otra consideración importante es el hecho de que el experimento se realizó a temperaturas muy similares por lo que el efecto de las propiedades dependiendo de la temperatura queda descartada. También se despreció la transferencia de calor en el dispositivo ya que no es ese el objetivo de este trabajo.

Se utilizó tubo de cobre de 10 mm de diámetro debido a que su conformabilidad es muy buena y se pudo fabricar el tubo de adecuada manera.

Se tomaron las propiedades del aire de tablas a la temperatura de experimentación sin tomar en cuenta la glicerina incluida en el flujo.

Por último cabe aclarar que las mediciones fueron hechas tratando de conservar los parámetros importantes fijos en todo momento.

Durante el desarrollo del experimento, una vez que se encontraba el centro y todo estaba listo se procedía a colocar el punto de medición en la orilla izquierda del tubo siempre sobre la línea horizontal central. A partir de ahí se comenzaba la carrera hacia la derecha midiendo de milímetro en milímetro. Después se colocaba el punto de medición sobre la línea vertical central y se medía de abajo hacia arriba también de milímetro en milímetro, por lo que se hacía una cruz sobre la boquilla del tubo.

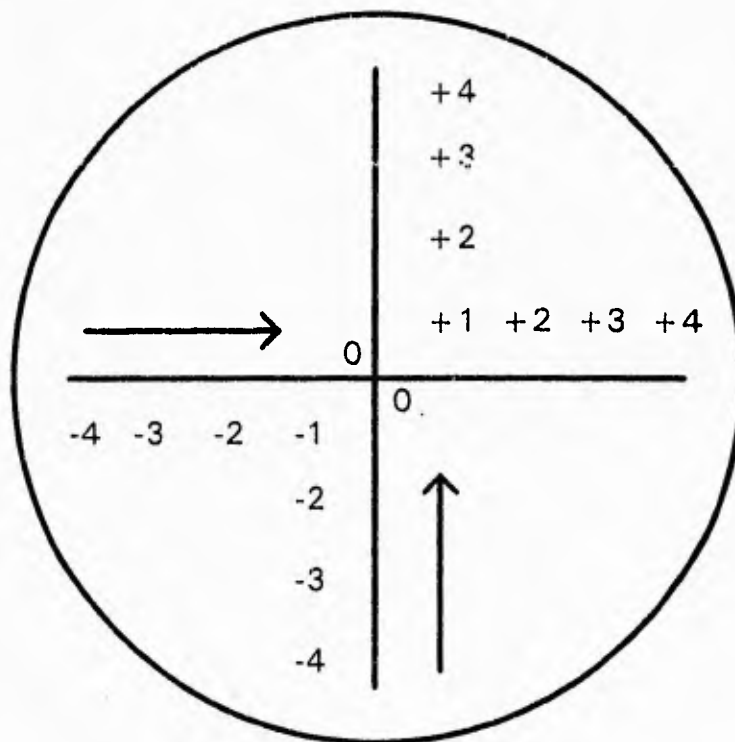
Cuando se terminaba de medir con un cierto gasto, se verificaban los resultados y si estos eran adecuados se pasaba a modificar las condiciones del flujo sobre el mismo tubo. Una vez medidas todas las posiciones sobre el tubo y con los tres gastos diferentes, se procedía a cambiar de tubo y a empezar todo de nuevo.

Cada vez que se medía sobre un punto es necesario mover cuidadosamente un milímetro sobre la dirección adecuada y proceder a reiniciar el ciclo de medición en el equipo y la computadora.

Es muy importante estar observando la señal en todo momento ya que esta nos dice si se está midiendo adecuadamente o no. Posteriormente en este capítulo se mencionará los problemas que se presentaron durante las experimentaciones.

Durante el proceso de experimentación es importante controlar el nivel de glicerina y la calidad de esta en todo momento. El manual del alimentador de partículas dice que se debe tener una mezcla agua glicerina en iguales proporciones y que además se debe contar con un nivel mínimo de 200 ml. para un buen funcionamiento. Para lograr esto el dispositivo cuenta con una ventana en el tanque y un tapón de rosca para un fácil llenado y rápido. Es también importante controlar la purga ya que en ciertos momentos pasan más partículas de las debidas por lo que se acumula el líquido en la manguera y es necesario removerlo continuamente para poder tener un flujo adecuado.

A continuación se presenta un esquema de la boquilla del tubo vista de frente en donde se indica de cierta forma la manera en que le llevaron a cabo las mediciones que fueron 108 por tubo es decir 540 en total.



tubo de 10 mm.

Como se ilustra en esta figura, esta es la sección del tubo en donde se efectuaron las mediciones. El diámetro de la sección es de 10 mm., pero solo se llegó a medir en 4 puntos del centro hacia los lados, ya que en el extremo, es decir en el punto donde el radio equivale a 5 o -5 la medición era sumamente difícil además de que el efecto del borde provocaba muchos problemas. Las flechas del diagrama indican la dirección de la experimentación para cada caso en específico, es decir para cada tubo y para cada gasto respectivamente. Para generar el movimiento vertical, se movía todo el sistema en esa dirección gracias a un motor eléctrico con variación de velocidad que nos permitía de buena manera mover de milímetro en milímetro. Para el caso horizontal, se contaba con un mecanismo en forma manual que nos proporcionaba dicho

movimiento de muy buena manera ya que una vuelta de la manivela representaba un milímetro de movimiento.

Finalmente, solo queda decir que a lo largo de la experimentación se presentaron diversos problemas que se fueron resolviendo a la medida de las posibilidades. A continuación se describen los más importantes.

Problemas Presentados en la Experimentación

El problema más común y por ende el más serio que se presentó durante el desarrollo de este proyecto fué el que se tuvo con el alimentador de partículas. Este alimentador era un poco caprichoso y por momentos el nivel en la concentración de partículas disminuía de manera considerable por lo que las mediciones no se podían realizar debido a la falta de puntos de dispersión adecuada de luz. Este problema se provocaba debido a que el alimentador solo funcionaba con glicerina de muy alta calidad y nueva. La glicerina es un fluido no-Newtoniano por lo que pierde sus propiedades al someterse a ciertos esfuerzos. Si la glicerina no era completamente nueva y de cierta marca la tobera del alimentador se atascaba y no se generaban un buen número de partículas. Era siempre necesario estar ajustando las válvulas y estar cambiando constantemente la glicerina. Otro problema que se presentaba con el sistema dosificador era la acumulación de líquido en la tubería flexible por lo que se tuvo que armar una conexión en forma de Y para poder purgar el sistema cada vez que fuese necesario. Es muy importante tener adecuada concentración de partículas ya que de no ser así, la computadora tardaba mucho en dar el resultado ya que al haber pocos cuerpos, las correlaciones hechas en la computadora se tardaban mucho. Este fué otro problema que se tuvo ya que en ocasiones se tardaba varios minutos en dar el resultado y esto retardó mucho el desarrollo.

Junto al problema de las partículas, se presentó el problema de la regulación de gasto constante para cada experimento. Esto fué debido a los problemas con las partículas, ya que cuando se tenía problemas con la alimentación de elementos de refracción, el gasto se modificaba y se tenía que volver a ajustar por lo que en muchas ocasiones se perdía la adecuada concentración de partículas nuevamente. En resumen podía caerse en un círculo vicioso en donde no se podían ajustar los parámetros adecuadamente por lo que se tenía que intentar una y otra vez hasta lograrlo.

Otro problema encontrado durante el desarrollo fué el poder ajustar adecuadamente el fotomultiplicador. La dificultad se presentaba ya que al terminar un experimento y tener que cubrir el equipo para protegerlo de la

humedad y polvo este se desalineaba al comenzar al siguiente día, por lo que nuevamente se tenía que ajustar.

En cuanto al equipo que utilizamos dentro del laboratorio para poder procesar la información de la señal proveniente del fotomultiplicador cabe decir que este funcionó adecuadamente a lo largo de todo el experimento y nunca presentó ningún tipo de fallo. Tanto el excitador de alto voltaje como los filtros y la memoria digital conectada a la computadora funcionaron adecuadamente.

Los resultados obtenidos en la computadora se podían observar en pantalla o imprimirlos en papel por medio del uso de una impresora.

Finalmente solo queda agregar que aunque se presentaron una serie de problemas que restaron continuidad a la experimentación todo se pudo resolver adecuadamente y los resultados obtenidos fueron cuidados al máximo. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Introducción

Los resultados obtenidos de la experimentación se presentarán a lo largo de este capítulo. Como se explicó en el capítulo anterior, durante el desarrollo de esta tesis se midieron diversas velocidades e intensidades de turbulencia en variados puntos a la salida de los diferentes tubos. Para cada tubo se presenta una hoja de resultados donde se pueden apreciar sus características geométricas así como las diferentes velocidades tomadas y las diferentes RMS. Cada tabla representa un tubo y esta información, se encuentra dividida en tres diferentes gastos. Dentro de cada gasto, se presentan las nueve mediciones de la línea horizontal y las nueve mediciones de la línea vertical. Cada valor representa un punto del tubo que se encuentra indicada en la tabla. Las unidades manejadas en las tablas son las siguientes: tanto las velocidades como los valores de RMS se encuentran en metros por segundo. Las posiciones dentro del tubo se encuentran en forma adimensional y los números de Reynolds por supuesto también son adimensionales. Al final de las nueve mediciones que se tienen en cada columna se puede observar el promedio. Este promedio es de gran utilidad para analizar los resultados en conjunto ya que individualmente sería muy difícil.

Dentro de las tablas también podemos encontrar una hoja de promedios en donde se intenta juntar la mayor información posible. Esta información se utilizará para el análisis dimensional que se desarrolló dentro del capítulo 2.

De las tablas de resultados y promedios se desprenden todas las gráficas que se presentan también dentro de este capítulo.

De la gráfica 1 a la gráfica 6 tenemos los perfiles de velocidad que se dan a lo largo y ancho de la sección en la salida del tubo. De la gráfica 7 a la gráfica 12 se tiene de igual manera las intensidades de turbulencia que se presentan en el tubo. En estas gráficas podemos ver el comportamiento de cada tubo en particular y además se puede comparar dentro del mismo espacio la evolución de las variables dependiendo de los diferentes tipos de tubos que se utilizan. Esto es de gran utilidad, ya que a simple vista podemos ver en donde se generan velocidades mayores, turbulencias mayores y también comparar todos los tubos para las mismas condiciones. Las gráficas se

encuentran en las mismas unidades que las tablas y en todos los casos exceptuando las de velocidad son todas adimensionales.

Por último se presentan las gráficas que tratan de englobar todo el experimento. Estas son la gráfica 13 y la 14. La gráfica 13 gráficas va acompañada de sus tablas y de sus correlaciones. La primera de estas gráficas nos relaciona las dos variables más representativas del análisis dimensional, donde se puede observar la relación entre el número de Reynolds y el número de Fernández, el cual es un número muy particular de este experimento. Dentro de esta gráfica se realizó una correlación lineal donde podemos conocer el comportamiento de los diferentes tubos dependiendo de la geometría y las velocidades y presiones. En la segunda gráfica podemos ver la relación que existe entre el número de Fernández y la intensidad de la turbulencia.

Tablas y Gráficas

A continuación se presentan todas las tablas y las gráficas del experimento.

TESIS SIN PAGINACION

COMPLETA LA INFORMACION

TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

TUBO 1, 5 VUELTAS, De=5 pulg., Di= 1 cm.							
h=10 cm. , L=63.5 cm.				h/N*Di=2, L/De=5			
Vel en m/s							
ΔP=294 Pa		PLANO 1 TEMP.=24.1					
	LINEA HORIZONTAL				LINEA VERTICAL		
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy	
-0.4	5.53	1.01	3.48E+03	7.57	0.7	4.76E+03	
-0.3	6.03	0.92	3.79E+03	8.96	1.05	5.64E+03	
-0.2	7.07	0.5	4.45E+03	9.61	0.36	6.05E+03	
-0.1	7.67	0.34	4.83E+03	9.4	0.45	5.92E+03	
0	7.82	0.61	4.92E+03	9.04	0.65	5.69E+03	
0.1	8.83	0.5	5.56E+03	8.48	0.68	5.34E+03	
0.2	10.11	0.5	6.36E+03	8.09	0.59	5.09E+03	
0.3	10.45	1.1	6.58E+03	8.05	0.45	5.07E+03	
0.4	9.61	1.23	6.05E+03	8.25	0.52	5.19E+03	
PROM.	8.12	0.745556	5112.93	8.61	0.605556	5415.71	
ΔP=392 Pa		PLANO 1 TEMP.= 24.1					
	LINEA HORIZONTAL				LINEA VERTICAL		
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy	
-0.4	9.09	1.61	5.72E+03	9.48	0.98	5.97E+03	
-0.3	9.41	1.15	5.92E+03	11.84	0.9	7.45E+03	
-0.2	9.84	0.97	6.19E+03	11.62	0.83	7.31E+03	
-0.1	10.01	0.82	6.30E+03	10.87	0.78	6.84E+03	
0	10.41	0.81	6.55E+03	10.22	0.72	6.43E+03	
0.1	10.65	0.81	6.70E+03	9.91	0.82	6.24E+03	
0.2	11.44	0.81	7.20E+03	9.88	1.06	6.22E+03	
0.3	11.81	0.87	7.43E+03	9.81	0.86	6.17E+03	
0.4	12.19	0.93	7.67E+03	9.62	0.93	6.05E+03	
PROM.	10.54	0.975556	6632.40	10.36	0.875556	6520.52	
ΔP=490 Pa		PLANO 1 TEMP.= 24.1					
	LINEA HORIZONTAL				LINEA VERTICAL		
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy	
-0.4	9.61	1.97	6.05E+03	9.06	1.56	5.70E+03	
-0.3	10.57	1.3	6.65E+03	13.72	1.32	8.63E+03	
-0.2	11.01	0.92	6.93E+03	13.81	0.83	8.69E+03	
-0.1	11.57	0.87	7.28E+03	13.34	0.96	8.40E+03	
0	12.44	0.98	7.83E+03	12.82	0.93	8.07E+03	
0.1	13.19	0.81	8.30E+03	12.24	0.96	7.70E+03	
0.2	13.79	0.72	8.68E+03	11.7	1.2	7.36E+03	
0.3	14.05	1.15	8.84E+03	11.02	1.01	6.94E+03	
0.4	13.85	1.27	8.72E+03	11.37	0.98	7.16E+03	
PROM.	12.23	1.11	7697.36	12.12	1.08	7627.44	

TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

TUBO 2, 5 VUELTAS, De=5 pulg., Di= 1 cm.						
h=16 cm. , L=63.5 cm.			h/N*Di=3.2, L/De=5			
Vel en m/s						
ΔP=294 Pa		PLANO 1 TEMP.=26.9				
	LINEA HORIZONTAL			LINEA VERTICAL		
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy
-0.4	6.84	0.65	4.30E+03	7.04	2.7	4.43E+03
-0.3	6.95	0.28	4.37E+03	10.49	0.85	6.60E+03
-0.2	7.27	0.51	4.58E+03	9.75	0.55	6.14E+03
-0.1	7.66	0.5	4.82E+03	9.24	0.74	5.81E+03
0	8.59	0.8	5.41E+03	8.21	0.78	5.17E+03
0.1	9.86	0.66	6.21E+03	8.19	0.53	5.15E+03
0.2	10.58	0.53	6.66E+03	8.55	0.62	5.38E+03
0.3	11	0.87	6.92E+03	9.17	0.74	5.77E+03
0.4	9.81	1.48	6.17E+03	5.97	0.65	3.76E+03
PROM.	8.73	0.697778	5493.32	8.512222	0.906667	5356.97
ΔP=392 Pa		PLANO 1 TEMP. = 26.9				
	LINEA HORIZONTAL			LINEA VERTICAL		
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy
-0.4	8.75	0.73	5.51E+03	9.78	2.02	6.15E+03
-0.3	8.98	0.65	5.65E+03	12.14	1.32	7.64E+03
-0.2	9.83	0.92	6.19E+03	12.14	0.53	7.64E+03
-0.1	11.1	1.03	6.99E+03	11.95	0.64	7.52E+03
0	11.82	0.67	7.44E+03	11.69	0.74	7.36E+03
0.1	12.2	0.71	7.68E+03	11.36	0.93	7.15E+03
0.2	12.56	0.88	7.90E+03	11.29	0.75	7.11E+03
0.3	12.26	1.34	7.72E+03	11.42	0.87	7.19E+03
0.4	10.19	2.24	6.41E+03	9.24	1.12	5.81E+03
PROM.	10.85	1.018889	6830.99	11.22333	0.991111	7063.14
ΔP=490 Pa		PLANO 1 TEMP. = 26.9				
	LINEA HORIZONTAL			LINEA VERTICAL		
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy
-0.4	10.6	0.67	6.67E+03	9.55	2.19	6.01E+03
-0.3	10.79	0.72	6.79E+03	13.69	0.99	8.62E+03
-0.2	11.79	0.99	7.42E+03	13.54	0.8	8.52E+03
-0.1	12.48	0.78	7.85E+03	13.31	0.9	8.38E+03
0	13.44	0.84	8.46E+03	13.07	0.85	8.23E+03
0.1	14.02	0.74	8.82E+03	12.75	0.77	8.02E+03
0.2	14.11	1.13	8.88E+03	12.92	0.85	8.13E+03
0.3	12.88	2.07	8.11E+03	12.48	0.89	7.85E+03
0.4	11.14	2.82	7.01E+03	8.97	1.72	5.65E+03
PROM.	12.36	1.20	7779.18	12.25	1.11	7711.35

TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

TUBO 3, 3 VUELTAS, De=5 pulg., Di= 1 cm.						
h=10 cm. , L=38.1 cm.			h/N*Di=3.3, L/De=3			
				Vel en m/s		
ΔP=294 Pa		PLANO 1		TEMP.=28.9		
		LINEA HORIZONTAL		LINEA VERTICAL		
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy
-0.4	9.49	1.27	5.97E+03	12.96	1.3	8.16E+03
-0.3	9.71	1.12	6.11E+03	12.97	1.03	8.16E+03
-0.2	9.91	0.96	6.24E+03	12.38	0.91	7.79E+03
-0.1	10.53	0.87	6.63E+03	12.01	0.9	7.56E+03
0	11.37	0.83	7.16E+03	11.74	0.81	7.39E+03
0.1	12.13	0.9	7.63E+03	11.06	0.89	6.96E+03
0.2	12.76	0.93	8.03E+03	10.77	0.85	6.78E+03
0.3	13.08	1.07	8.23E+03	11.25	1.1	7.08E+03
0.4	13.1	1.21	8.24E+03	10.19	1.2	6.41E+03
PROM.	11.34	1.017778	7137.96	11.70	0.998889	7365.22
ΔP=392 Pa		PLANO 1		TEMP. = 28.9		
		LINEA HORIZONTAL		LINEA VERTICAL		
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy
-0.4	11.6	1.1	7.30E+03	11.78	1.4	7.41E+03
-0.3	11.85	0.87	7.46E+03	14.2	1.3	8.94E+03
-0.2	11.93	1.06	7.51E+03	13.35	1.38	8.40E+03
-0.1	12.4	1.03	7.80E+03	13.07	0.99	8.23E+03
0	13.03	1.07	8.20E+03	12.5	1.21	7.87E+03
0.1	13.63	1.41	8.58E+03	12.79	0.95	8.05E+03
0.2	14.59	1.32	9.18E+03	12.54	1.28	7.89E+03
0.3	14.79	1.55	9.31E+03	12.57	1.2	7.91E+03
0.4	14.32	1.72	9.01E+03	12.42	1.3	7.82E+03
PROM.	13.13	1.236667	8260.96	12.80	1.223333	8056.78
ΔP=490 Pa		PLANO 1		TEMP. = 28.9		
		LINEA HORIZONTAL		LINEA VERTICAL		
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy
-0.4	12.85	1.4	8.09E+03	14.7	1.78	9.25E+03
-0.3	13.05	0.86	8.21E+03	16.46	1.2	1.04E+04
-0.2	13.11	0.89	8.25E+03	15.45	1.8	9.72E+03
-0.1	13.55	1.21	8.53E+03	15.09	1.39	9.50E+03
0	14.41	1.27	9.07E+03	14.38	1.37	9.05E+03
0.1	15.55	1.49	9.79E+03	14.01	1.24	8.82E+03
0.2	16.46	1.46	1.04E+04	13.43	1.24	8.45E+03
0.3	16.59	1.72	1.04E+04	14.28	1.08	8.99E+03
0.4	15.89	1.99	1.00E+04	13.31	1.4	8.38E+03
PROM.	14.61	1.37	9192.36	14.57	1.39	9167.89

TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

TUBO 4, 3 VUELTAS, De=5 pulg., Di= 1 cm.						
h=6.5 cm. , L=38.1 cm.			h/N*Di=2.1, L/De=3			
Vel en m/s						
ΔP=294 Pa		PLANO 1			TEMP.=28.9	
	LINEA HORIZONTAL				LINEA VERTICAL	
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy
-0.4	9.6	0.96	6.04E+03	12.41	0.99	7.81E+03
-0.3	9.44	0.53	5.94E+03	12.41	0.72	7.81E+03
-0.2	10.22	0.75	6.43E+03	12.1	0.97	7.61E+03
-0.1	10.99	0.75	6.92E+03	11.91	0.91	7.50E+03
0	12.03	0.76	7.57E+03	11.74	1.05	7.39E+03
0.1	12.64	0.68	7.95E+03	11.62	1.16	7.31E+03
0.2	13.14	0.95	8.27E+03	11.2	0.93	7.05E+03
0.3	13.37	1.02	8.41E+03	11.28	0.89	7.10E+03
0.4	12.41	1.64	7.81E+03	10.19	0.88	6.41E+03
PROM.	11.54	0.893333	7261.03	11.65	0.944444	7332.35
ΔP=392 Pa		PLANO 1			TEMP. = 28.9	
	LINEA HORIZONTAL				LINEA VERTICAL	
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy
-0.4	11.53	1.4	7.26E+03	14.56	1.32	9.16E+03
-0.3	11.59	1.3	7.29E+03	14.81	1.4	9.32E+03
-0.2	12.31	0.94	7.75E+03	14.58	1.41	9.18E+03
-0.1	13.37	1.06	8.41E+03	14.35	0.86	9.03E+03
0	14.44	0.95	9.09E+03	13.94	0.91	8.77E+03
0.1	15.1	0.79	9.50E+03	13.43	1.17	8.45E+03
0.2	15.53	0.85	9.77E+03	13.62	0.88	8.57E+03
0.3	15.5	1.38	9.75E+03	13.94	1.27	8.77E+03
0.4	13.65	2.25	8.59E+03	12.42	1.3	7.82E+03
PROM.	13.67	1.213333	8602.20	13.96	1.168889	8786.10
ΔP=490 Pa		PLANO 1			TEMP. = 28.9	
	LINEA HORIZONTAL				LINEA VERTICAL	
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy
-0.4	12.51	0.93	7.87E+03	14.11	2.19	8.88E+03
-0.3	12.84	0.9	8.08E+03	15.9	1.7	1.00E+04
-0.2	13.39	1.1	8.43E+03	16.16	1.85	1.02E+04
-0.1	13.88	1.69	8.74E+03	16.13	1.34	1.02E+04
0	15.19	1.75	9.56E+03	15.96	1.29	1.00E+04
0.1	15.9	1.77	1.00E+04	15.61	1.31	9.82E+03
0.2	15.87	2.23	9.99E+03	15.37	1.39	9.67E+03
0.3	15.51	2.24	9.76E+03	15.66	1.26	9.86E+03
0.4	14.5	3.01	9.13E+03	13.31	1.4	8.38E+03
PROM.	14.40	1.74	9061.60	15.36	1.53	9664.36

TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

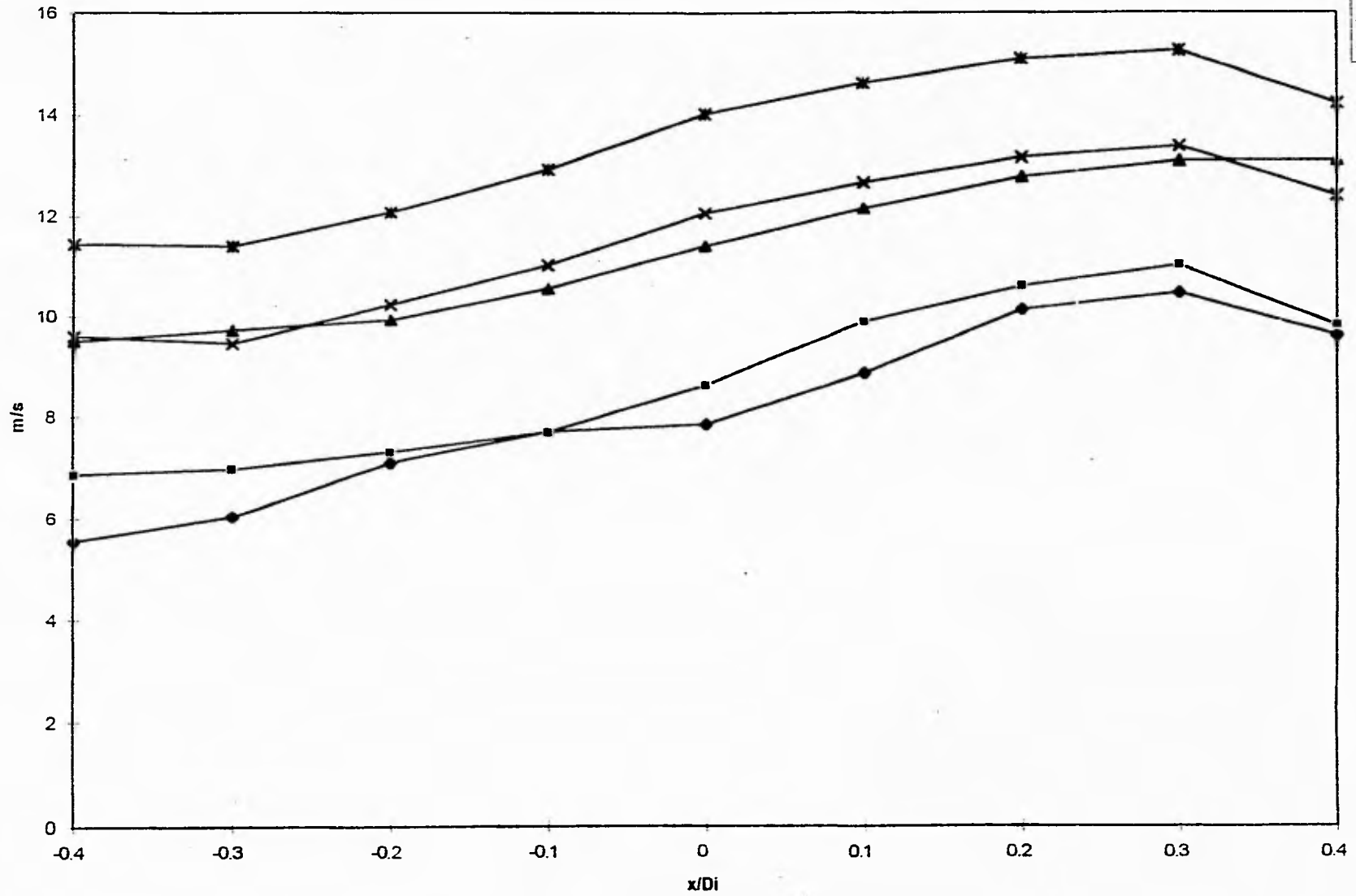
TUBO 5, 2 VUELTAS, De=5 pulg., Di= 1 cm.							
h=6 cm. , L=25.4 cm.				h/N*Di=2, L/De=2			
Vel en m/s							
ΔP=294 Pa		PLANO 1				TEMP.=26	
LINEA HORIZONTAL				LINEA VERTICAL			
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy	
-0.4	11.44	0.89	7.20E+03	15.62	1.04	9.83E+03	
-0.3	11.39	0.84	7.17E+03	15.42	0.90	9.71E+03	
-0.2	12.06	0.99	7.59E+03	15.24	0.93	9.59E+03	
-0.1	12.92	1.10	8.13E+03	14.69	1.24	9.25E+03	
0	14.00	1.23	8.81E+03	14.53	1.11	9.14E+03	
0.1	14.60	1.08	9.19E+03	14.14	0.87	8.90E+03	
0.2	15.08	1.40	9.49E+03	13.97	0.99	8.79E+03	
0.3	15.24	1.57	9.59E+03	14.27	0.81	8.98E+03	
0.4	14.20	1.93	8.94E+03	14.52	1.21	9.14E+03	
PROM.	13.44	1.23	8455.92	14.71	1.01	9258.91	
ΔP=392 Pa		PLANO 1				TEMP. = 26	
LINEA HORIZONTAL				LINEA VERTICAL			
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy	
-0.4	12.41	0.95	7.81E+03	15.94	1.03	1.00E+04	
-0.3	12.67	1.08	7.97E+03	15.82	1.16	9.95E+03	
-0.2	12.90	1.12	8.12E+03	15.85	1.03	9.97E+03	
-0.1	13.73	1.40	8.64E+03	15.97	1.01	1.01E+04	
0	14.64	2.01	9.21E+03	15.74	0.84	9.91E+03	
0.1	14.31	2.34	9.00E+03	15.64	0.74	9.84E+03	
0.2	15.47	2.46	9.74E+03	15.72	0.63	9.89E+03	
0.3	16.38	2.37	1.03E+04	15.49	0.84	9.75E+03	
0.4	15.39	2.53	9.68E+03	16.01	0.80	1.01E+04	
PROM.	14.21	1.81	8942.35	15.80	0.90	9941.87	
ΔP=490 Pa		PLANO 1				TEMP. = 26	
LINEA HORIZONTAL				LINEA VERTICAL			
POSICION	Vx	RMSx	REYNOLDSx	Vy	RMSy	REYNOLDSy	
-0.4	14.35	1.23	9.06E+03	16.61	1.24	1.05E+04	
-0.3	14.30	1.33	9.00E+03	16.94	1.24	1.07E+04	
-0.2	14.79	1.44	9.30E+03	16.73	1.37	1.05E+04	
-0.1	15.23	1.80	9.59E+03	16.98	1.30	1.07E+04	
0	15.75	2.27	9.91E+03	17.25	1.06	1.09E+04	
0.1	16.39	2.38	1.03E+04	16.21	1.31	1.02E+04	
0.2	13.95	3.42	8.78E+03	16.73	1.17	1.05E+04	
0.3	14.62	2.68	9.20E+03	16.79	1.05	1.06E+04	
0.4	15.55	2.40	9.79E+03	16.49	1.27	1.04E+04	
PROM.	15.00	2.11	9438.22	16.75	1.22	10540.23	

TURBULENCA EN TUBOS HELICOIDALES

GRÁFICA 1

COMPARACION DE PERFIL DE VELOCIDADES LINEA HORIZONTAL $\Delta P=294$ Pa

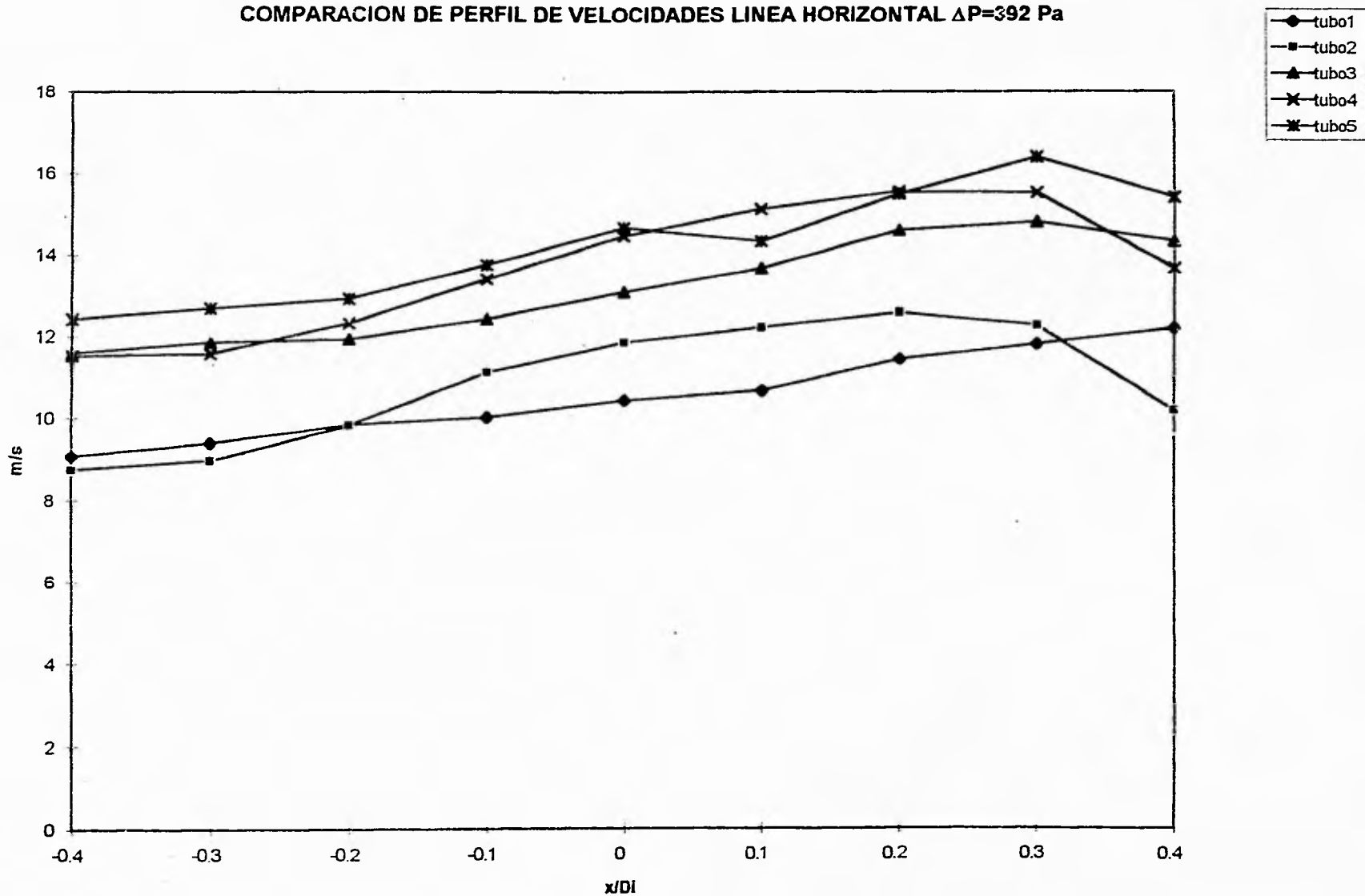
- tubo1
- tubo2
- ▲ tubo3
- × tubo4
- * tubo5



TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

GRÁFICA 2

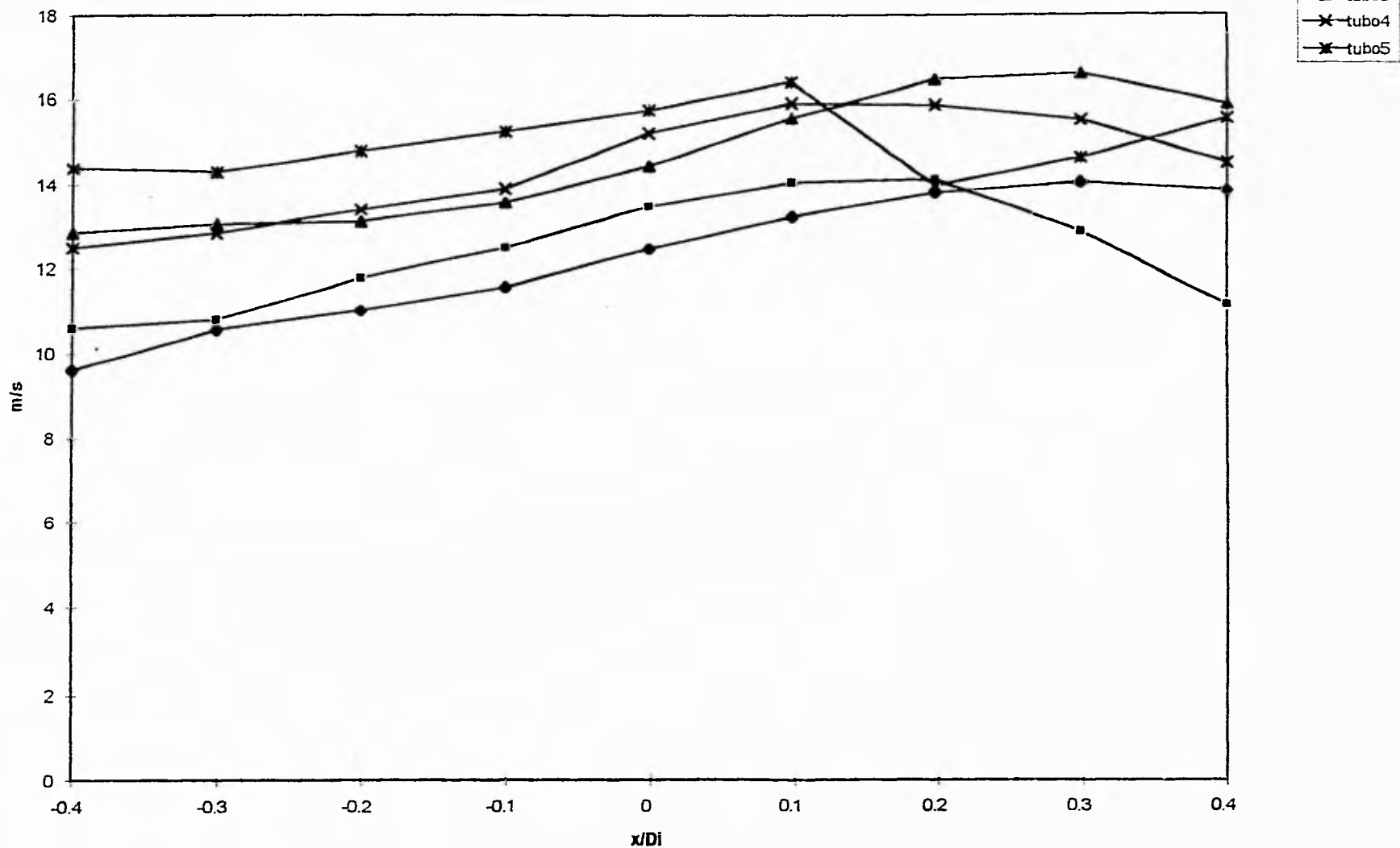
COMPARACION DE PERFIL DE VELOCIDADES LINEA HORIZONTAL $\Delta P=392$ Pa



TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

GRÁFICA 3

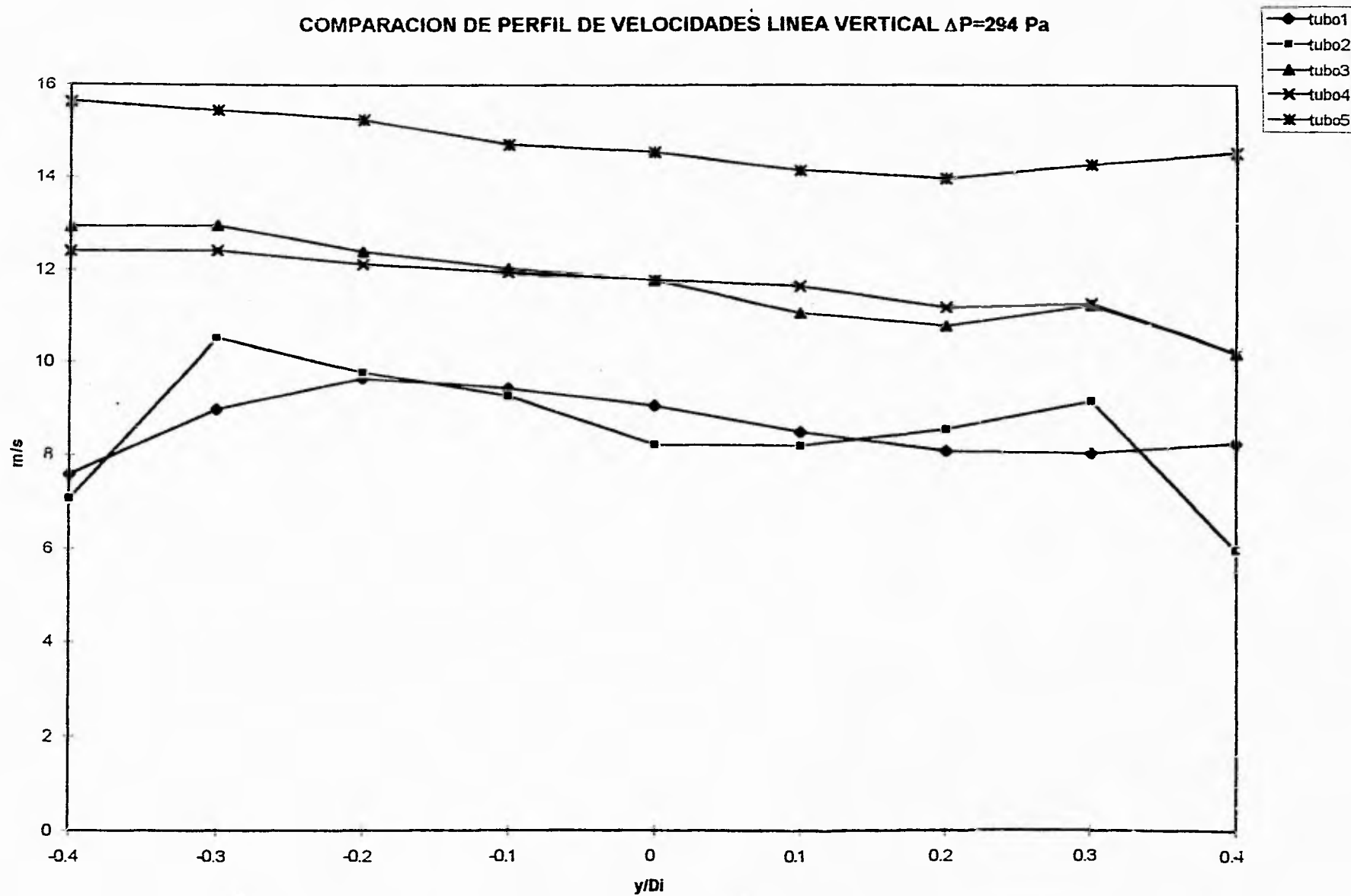
COMPARACION DE PERFIL DE VELOCIDADES LINEA HORIZONTAL $\Delta P=490$ Pa



TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

GRÁFICA 4

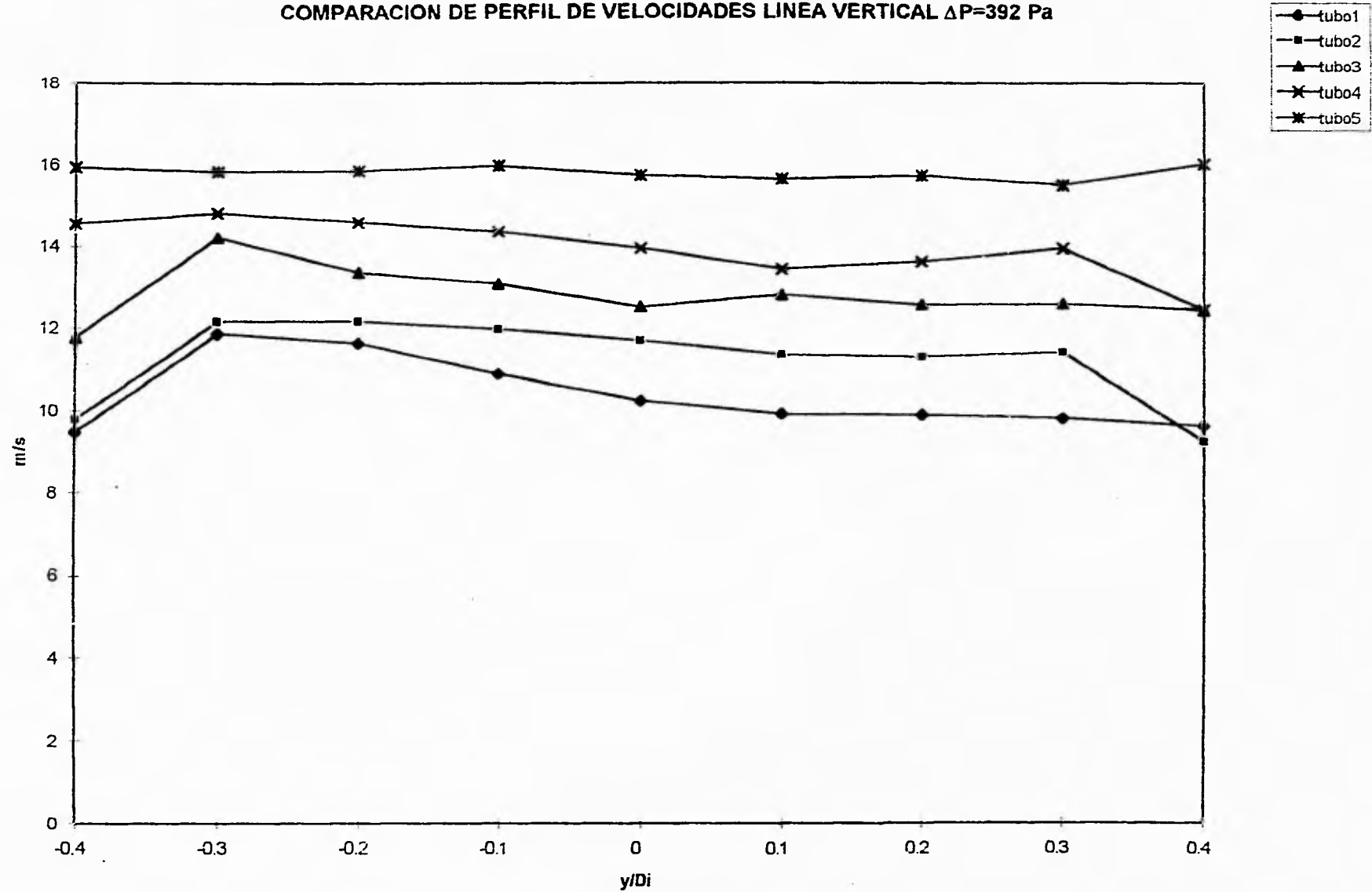
COMPARACION DE PERFIL DE VELOCIDADES LINEA VERTICAL $\Delta P=294$ Pa



TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

GRÁFICA 5

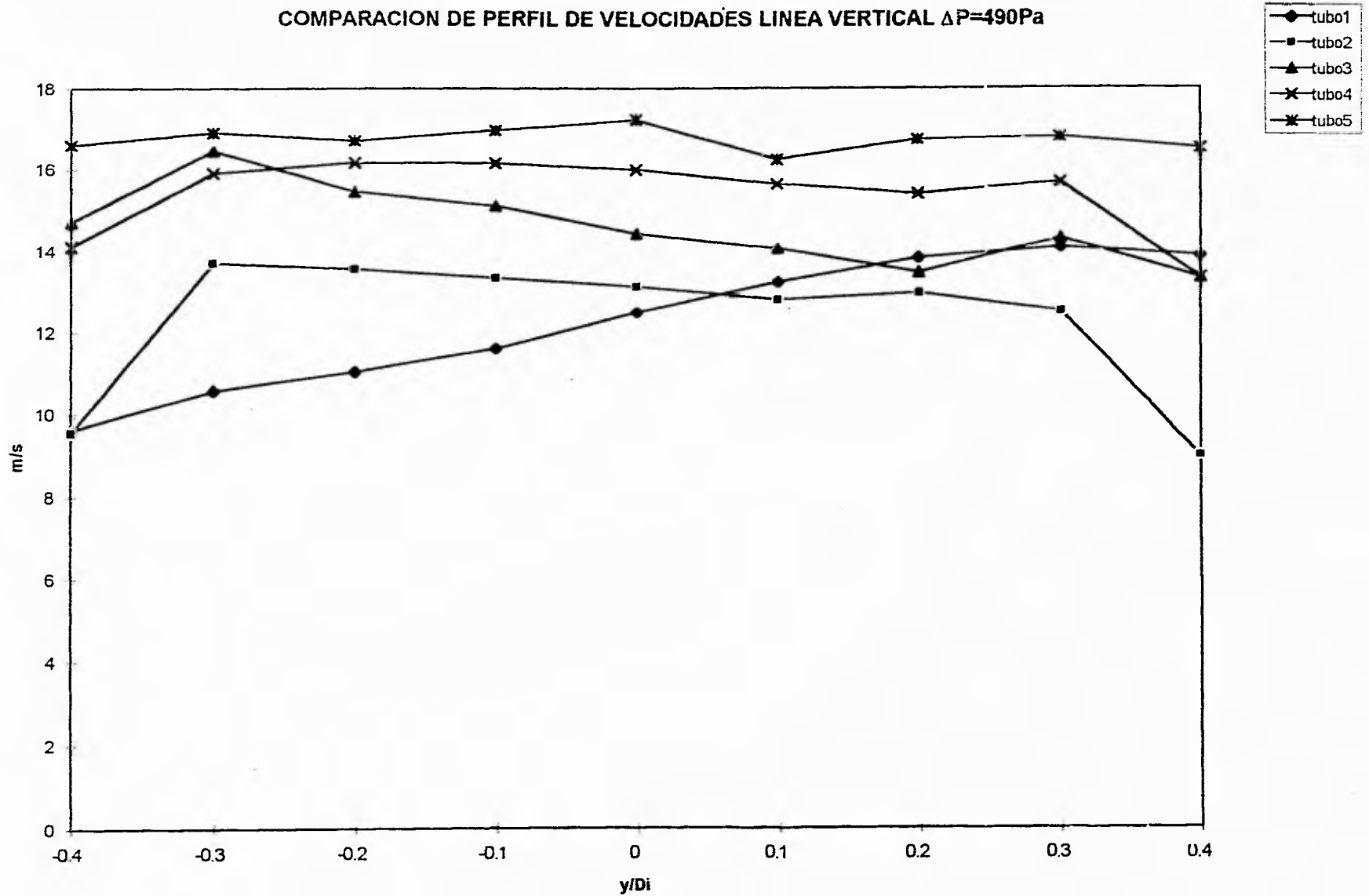
COMPARACION DE PERFIL DE VELOCIDADES LINEA VERTICAL $\Delta P=392$ Pa



TURBULENCA EN TUBOS HELICOIDALES

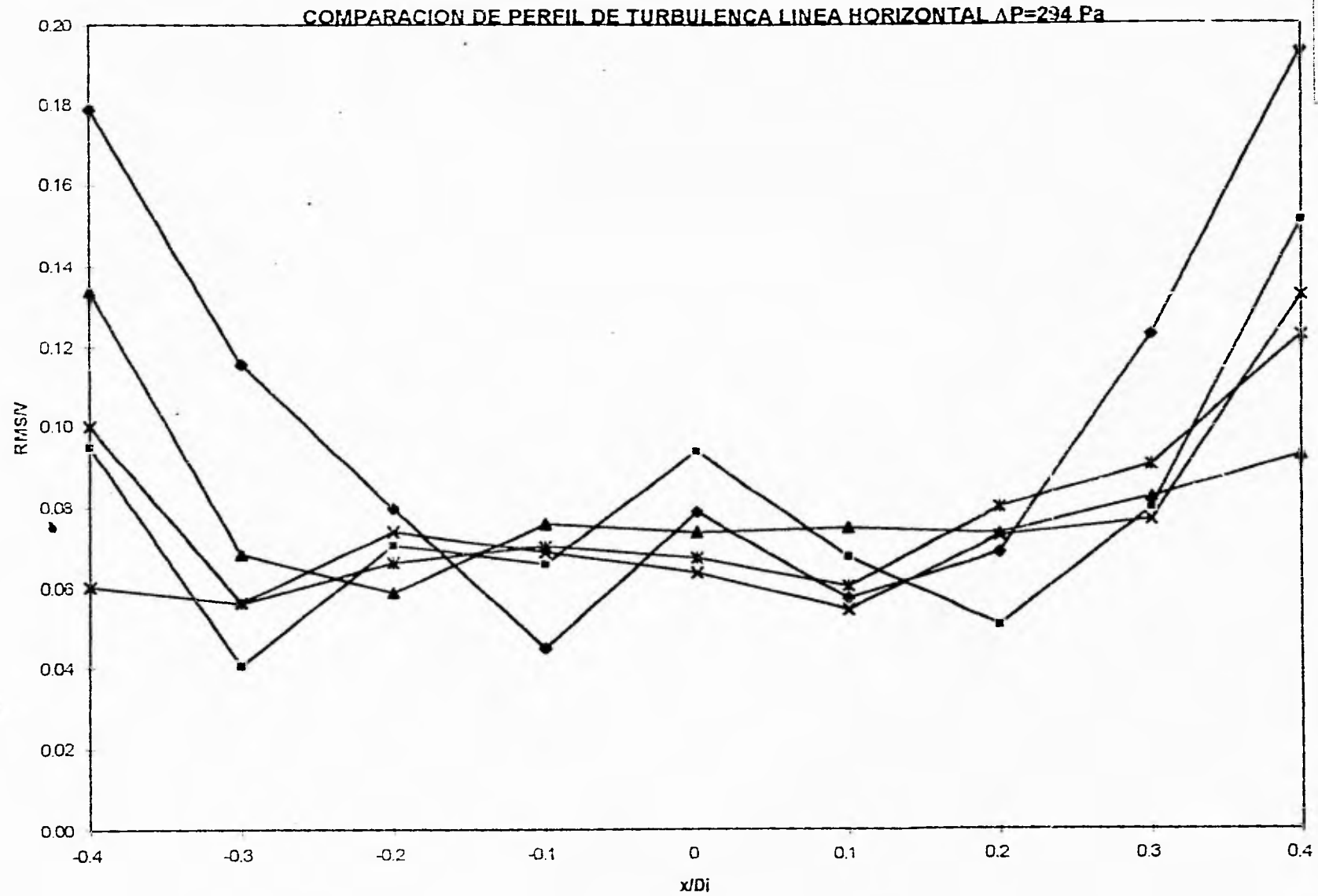
GRÁFICA 6

COMPARACION DE PERFIL DE VELOCIDADES LINEA VERTICAL $\Delta P=490\text{Pa}$



TURBULENCA EN TUBOS HELICOIDALES

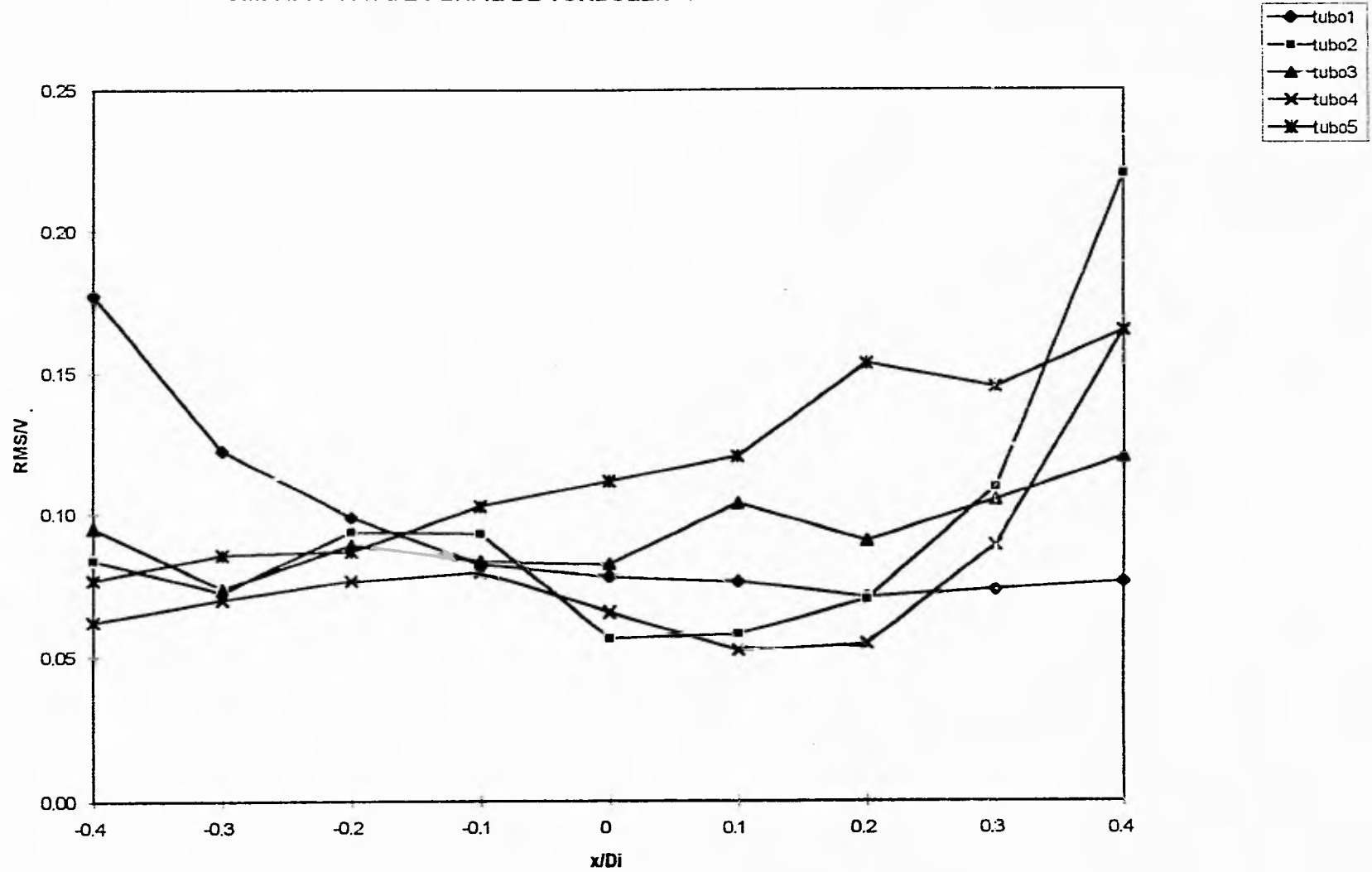
GRÁFICA 7



TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

GRÁFICA 8

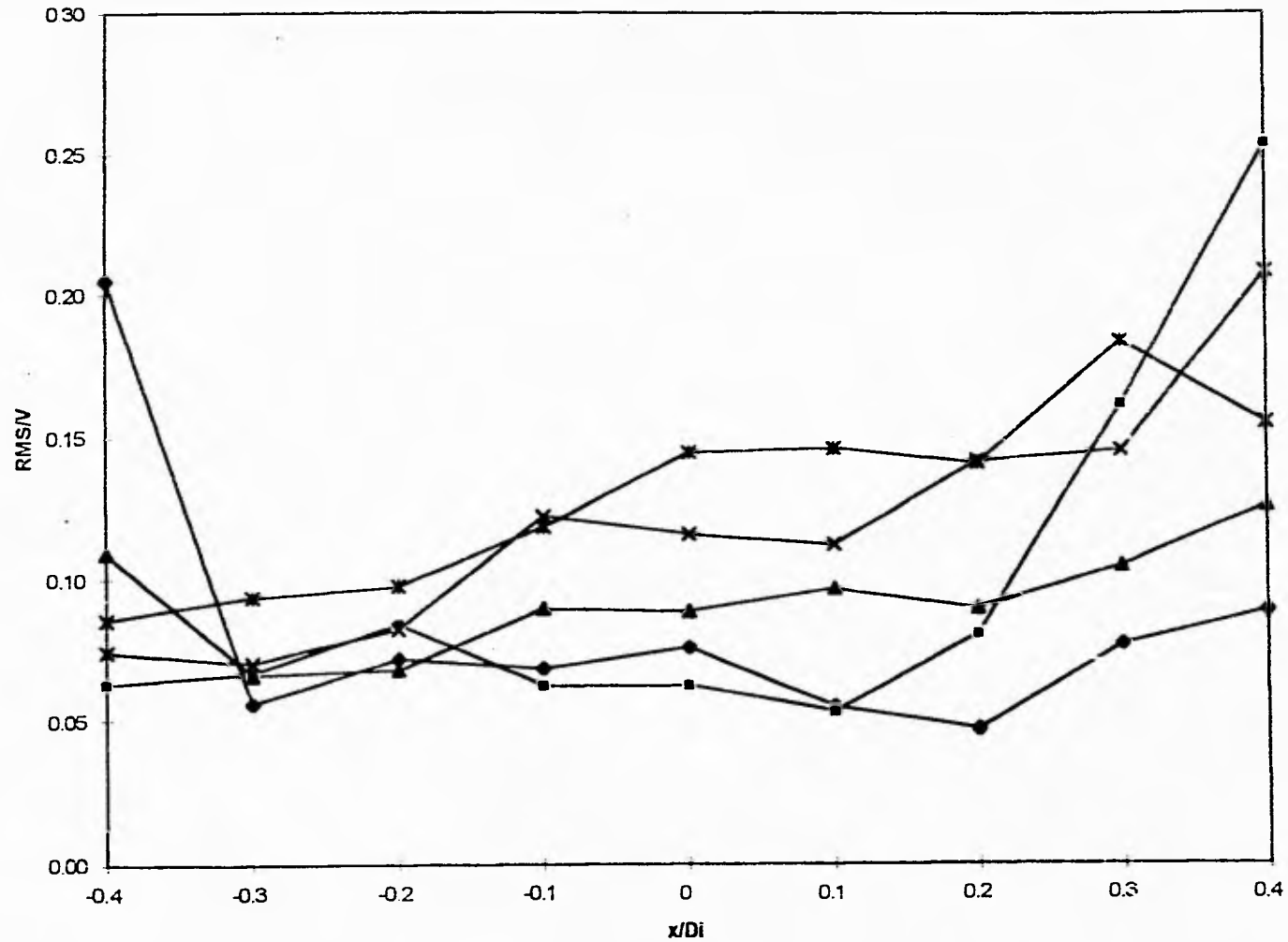
COMPARACION DE PERFIL DE TURBULENCIA LINEA HORIZONTAL $\Delta P=392$ Pa



TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

GRÁFICA 9

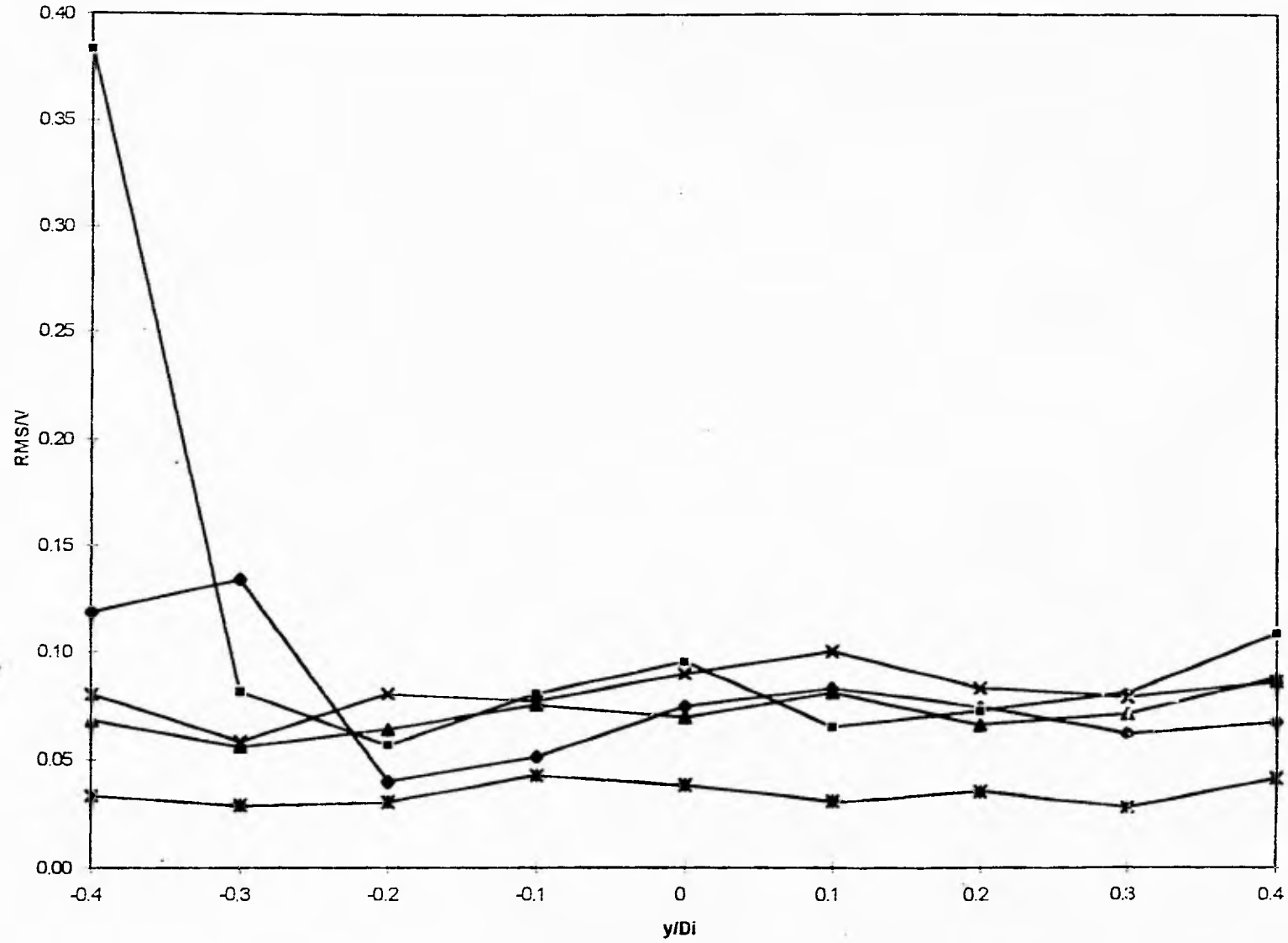
COMPARACION DE PERFIL DE TURBULENCIA LINEA HORIZONTAL $\Delta P=490$ Pa



TURBULENCA EN TUBOS HELICOIDALES

GRÁFICA 10

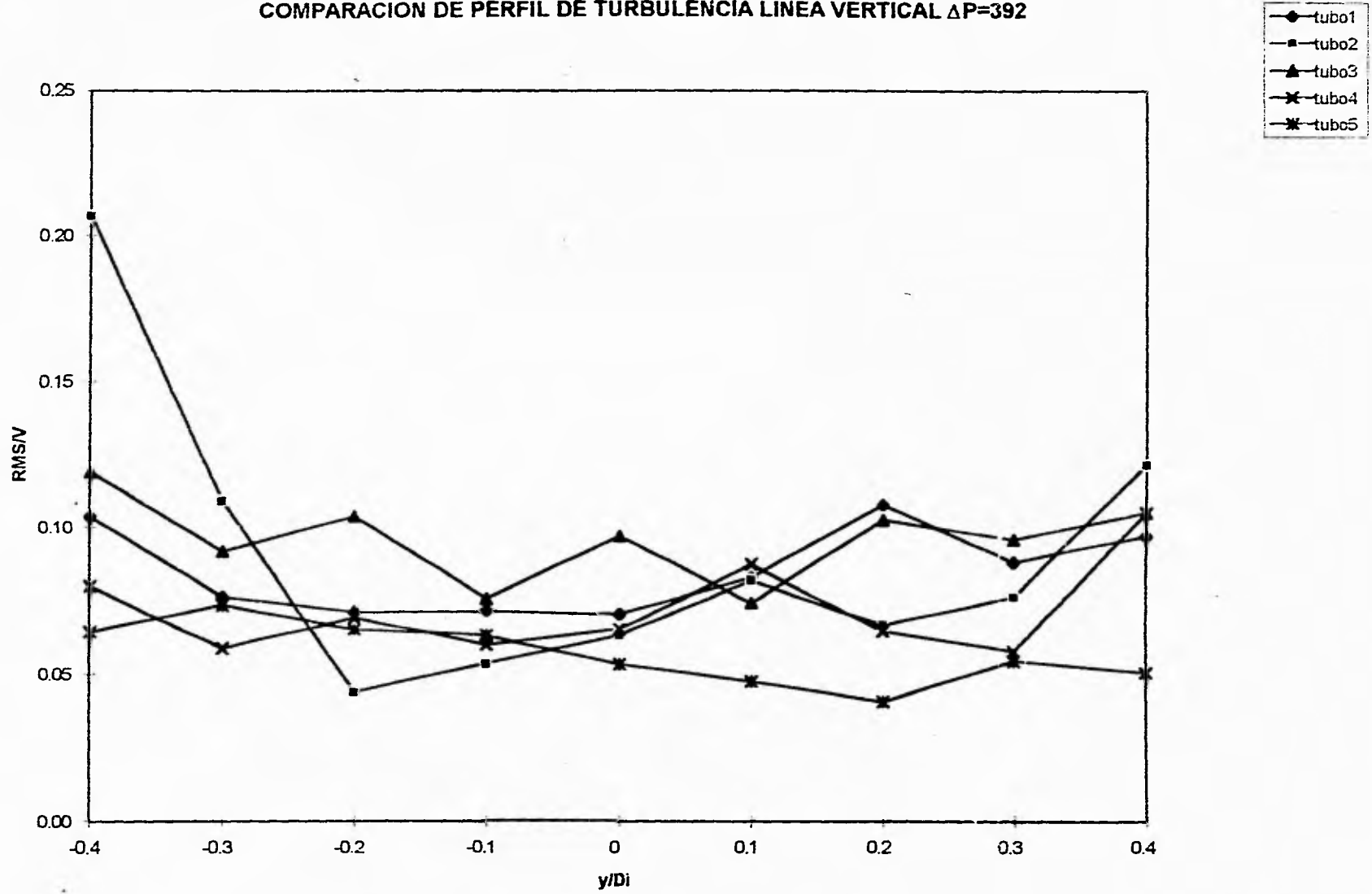
COMPARACION DE PERFIL DE TURBULENCA LINEA VERTICAL $\Delta P=294$



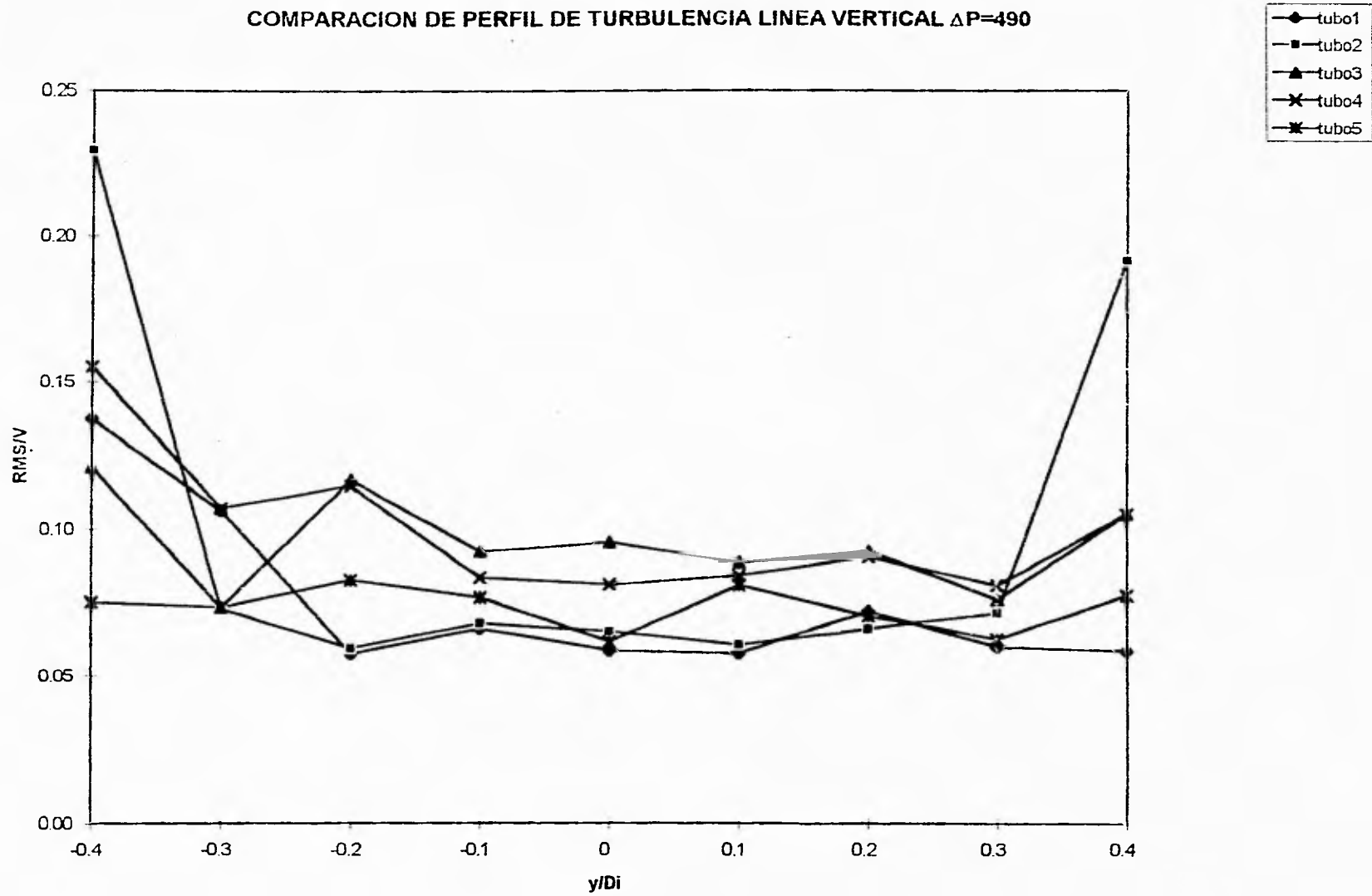
TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

GRÁFICA 11

COMPARACION DE PERFIL DE TURBULENCIA LINEA VERTICAL $\Delta P=392$



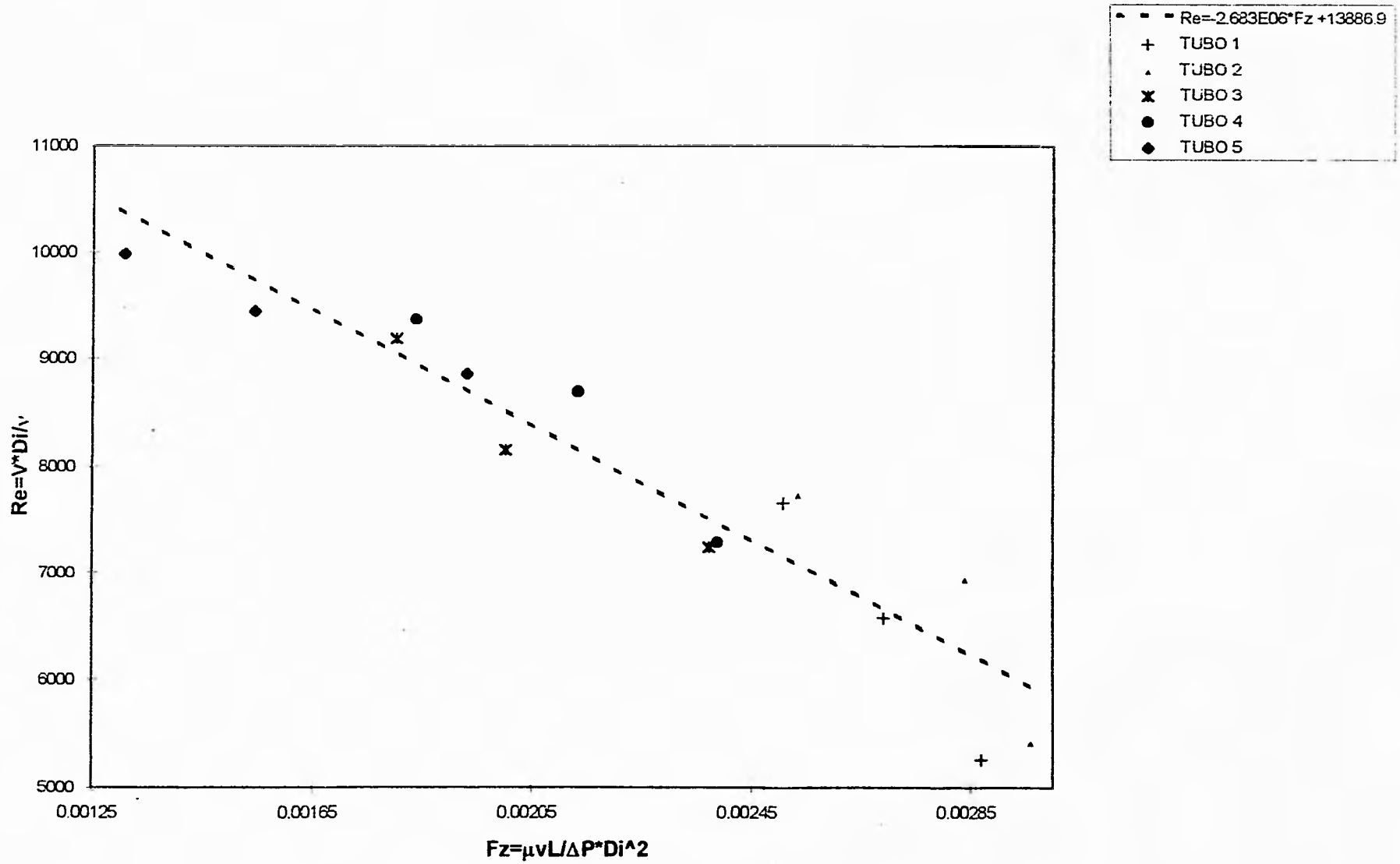
COMPARACION DE PERFIL DE TURBULENCIA LINEA VERTICAL $\Delta P=490$



TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

PROMEDIOS										
TUBO	PRESION	Vx	RMSx	Rex	Vy	RMSy	Rey	V. pro	RMSpro	Int. turb.
	Pa	m/s	cm/s	Adim.	m/s	cm/s	Adim.	m/s	m/s	Adim.
1	294	8.12	72	5112	8.61	60	5415	8.365	0.66	0.076
	392	10.54	97	6632	10.36	88	6520	10.45	0.925	0.089
	490	12.23	112	7697	12.12	108	7627	12.175	1.1	0.097
2	294	8.73	70	5493	8.51	90	5357	8.62	0.8	0.090
	392	10.85	102	6830	11.22	99	7063	11.035	1.005	0.091
	490	12.36	120	7780	12.25	110	7711	12.305	1.15	0.093
3	294	11.34	101	7137	11.7	99	7365	11.52	1	0.087
	392	13.13	123	8261	12.8	122	8056	12.965	1.225	0.091
	490	14.61	136	9192	14.57	139	9168	14.59	1.375	0.094
4	294	11.54	89	7267	11.65	94	7332	11.595	0.915	0.079
	392	13.67	121	8602	13.96	116	8786	13.815	1.185	0.086
	490	14.4	173	9062	15.36	152	9664	14.88	1.625	0.109
5	294	13.44	125	8455	14.71	103	9258	14.075	1.14	0.082
	392	14.21	180	8942	15.8	89	9941	15.005	1.345	0.093
	490	15	210	9438	16.75	122	10540	15.875	1.66	0.105

RELACION Re CONTRA # DE FERNANDEZ



TURBULENCIA EN TUBOS HELICOIDALES

REGRESIÓN LINEAL

Tabla de Valores

# TUBO	Fz	Re
1	0.0029	5261
	0.0027	6576
	0.0025	7659
2	0.003	5425
	0.0028	6941
	0.0025	7741
3	0.0024	7250
	0.002	8156
	0.0018	9182
4	0.0024	7294
	0.0021	8691
	0.0018	9364
5	0.0019	8855
	0.0015	9440
	0.0013	9987

$\Sigma X=0.3372$

$\Sigma Y=117814.17$

$\Sigma X*X=0.00007935$

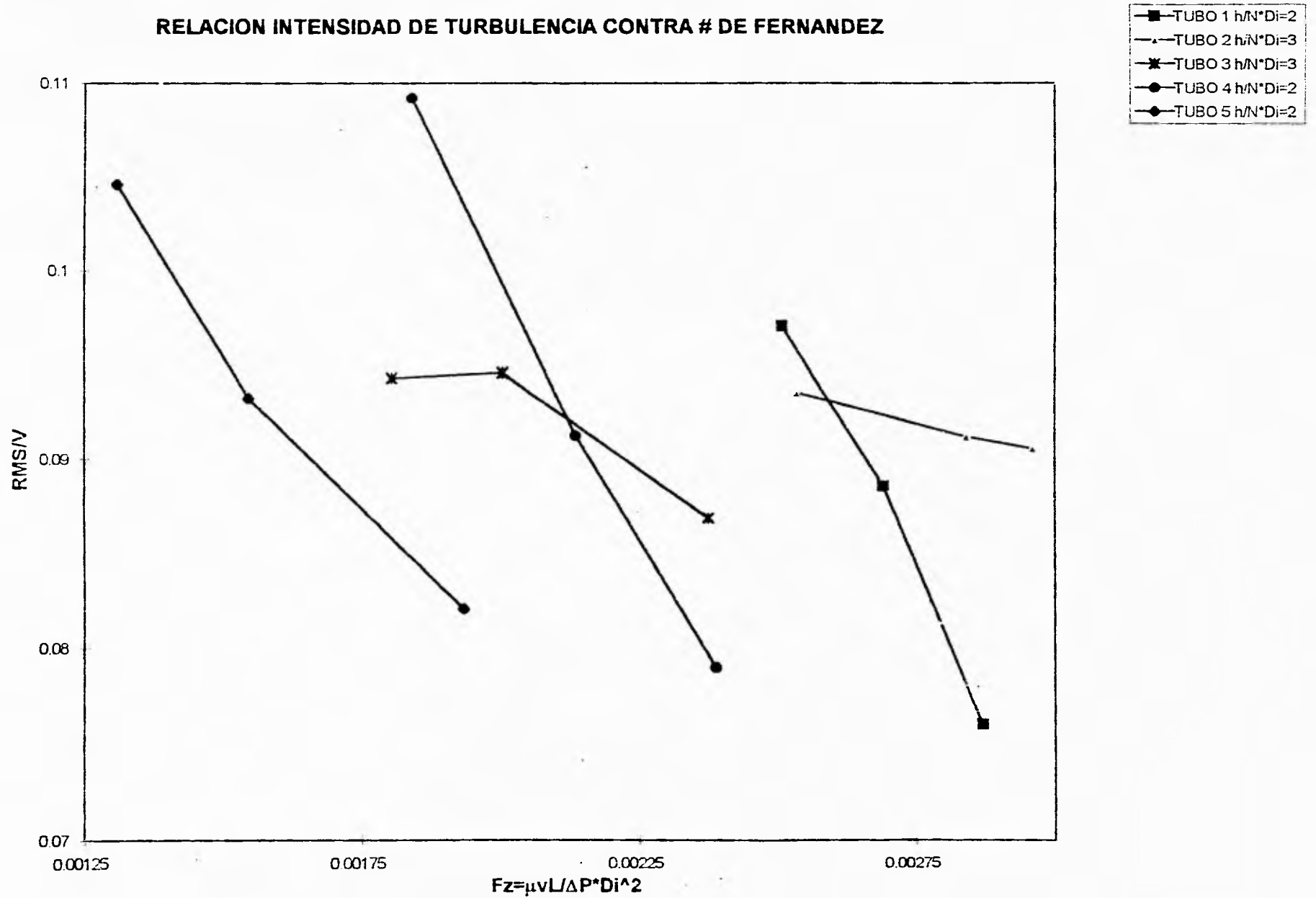
$\Sigma Y*Y=954066647$

$\Sigma X*Y=255.38$

Por lo que:

$Re = -2.683E06 * Fz + 13886.9$

RELACION INTENSIDAD DE TURBULENCIA CONTRA # DE FERNANDEZ

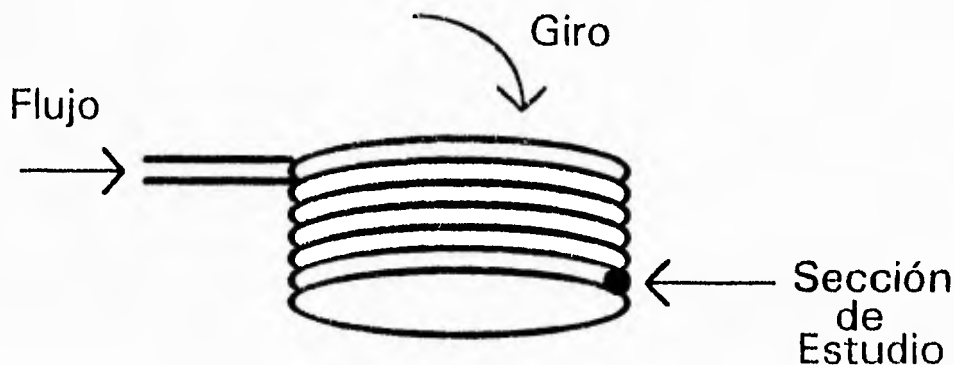


CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados de la experimentación y las gráficas del capítulo anterior podemos concluir varios aspectos. Comenzaremos por los más sencillos para luego llegar a las gráficas de correlaciones y poder encontrar el comportamiento de los diferentes tubos helicoidales por medio del análisis adimensional.

De las gráficas de velocidad, gráficas 1-6, podemos concluir que en cada uno de los tubos y en todos los gastos manejados, el perfil de velocidades se encuentra desplazado hacia la parte derecha de la sección del tubo. Esto es debido a que todos los tubos helicoidales se encontraban colocados de la misma manera con el flujo girando en sentido de las manecillas del reloj por lo que si atendemos al siguiente esquema podremos entender mejor esto:



De esta manera, si observamos la sección de frente como se ilustró en el capítulo 3 y con la ayuda del esquema anterior, ahora sí podremos comprender porque el perfil tiende hacia la zona de la derecha en la línea horizontal. Esto es debido al efecto de la fuerza centrífuga que se presenta en este tipo de dispositivos. Las líneas de velocidad tienden a juntarse a mayores diferencias de presión, y el perfil es mucho más parejo en los casos de velocidades mayores, es decir a velocidades pequeñas, existe notable diferencia entre las velocidades que se presentan en los tubos de pocas con muchas espiras. En esta línea siempre existe la velocidad máxima en la derecha del tubo. Podemos

concluir entonces, que en estos tubos el efecto de la fuerza centrífuga es un efecto importante ya será la encargada de producir el perfil asimétrico.

En cuanto a la línea vertical, podemos ver el perfil es muy homogéneo tendiendo un poco hacia la zona inferior debido a la inclinación del flujo dentro del tubo. Los tubos más elongados cargan un poco más su perfil hacia abajo pero no de una manera significativa o importante. En resumen, a diferencia de la línea horizontal donde la fuerza centrífuga fué un factor determinante, en dirección vertical parece que el dispositivo no influye mucho ni los cambios de geometría.

En cuanto a la intensidad de la turbulencia reflejada en gráficas 7-12, se tiene una comparación para cada caso, y podemos llegar a las siguientes conclusiones.

La primera es que en las orillas del tubo, la intensidad de la turbulencia es muy grande a comparación de los centros. Esto no es ningún efecto producido por la geometría de nuestros tubos sino por el efecto borde que se presenta en cualquier chorro.

En el eje horizontal podemos concluir que a velocidades bajas la intensidad de la turbulencia es simétrica en el sentido de que se comporta de forma muy similar tanto a la izquierda como a la derecha y en todos los casos. A medida que aumenta el gasto o la velocidad, podemos notar que la intensidad de turbulencia al igual que la velocidad, se comienza a jalar hacia la zona derecha de nuestra sección. Las líneas que representan esta función se comienzan a separar perdiéndose la simetría del anterior caso. Despreciando el efecto borde, se produce mayor intensidad de turbulencia en los tubos más elongados.

En cuanto al eje vertical, podemos también distinguir el efecto borde claramente. Despreciando este efecto podemos distinguir que la intensidad de la turbulencia es constante a lo largo del eje y que además en promedio tiende a ser mayor en aquellos tubos con número de vueltas intermedias. En otras palabras si se tenían tubos con 5 vueltas, 3 y 2 se puede apreciar un mayor efecto en los tubos de 3, y casi siempre siendo el valor mínimo aquél tubo con menor número de revoluciones. De esta manera, podemos concluir que el número de vueltas no influye en la generación de turbulencia ya que en esta línea el tubo de dos espiras presentó menor intensidad.

Considerando dentro del análisis nuestro desarrollo experimental, podemos ver que del capítulo 2 la función resultante es la siguiente:

$$\frac{v'}{\bar{v}} = I = f \left\{ \text{Re}, \frac{D_i^2 \Delta P}{\mu v L}, N, \frac{D_e}{D_i}, \frac{h}{D_i} \right\}$$

Aquí podemos encontrar que la intensidad de la turbulencia es una función del número de Reynolds, del número de Fernández y de la geometría. Por esta razón las gráficas que resumen toda la información son las gráficas que representan el Re contra el Fz, y el RMS/v contra el Fz ya que este parámetro adimensional nos relaciona fuerzas normales contra cortantes. Estas gráficas incluyen todos los promedios de los datos incluyendo ejes horizontales y verticales.

En la gráfica de Re-Fz, podemos ver una cierta relación entre estos dos parámetros y podemos concluir que una regresión lineal nos aproxima adecuadamente el comportamiento de los diferentes tubos que se tengan, es decir que si en el futuro se desea conocer un Reynolds para una cierta geometría bastará recurrir a la gráfica para conocer el Fz y así poder determinar la presión con la que el fluido debe entrar al dispositivo. Podemos distinguir claramente que a medida que aumenta el número Fz el Reynolds disminuye por lo que si se desean Re altos se deben manejar Fz pequeños. Esto es, los esfuerzos viscosos cortantes deben de ser mucho más pequeños que los normales. Esta correlación es el resultado de muchos promedios, realizada por computadora siendo la mejor correlación la lineal.

En la gráfica RMS/v-Fz es mucho más difícil intentar realizar una correlación, ya que la dispersión de los datos es muy notoria. Así que no se pudo hacer una gráfica general al igual que la anterior. Por esta razón se gráfica uniéndolo con líneas cada tubo en particular y de esta manera podemos decir que los tubos de espiras iguales se comportan dentro de la misma zona aunque no de igual manera. Dentro de la gráfica cada tubo tiene características geométricas diferentes. Al decir que tubos con igual número de espiras se encuentran en la misma zona nos referimos a que sus números de Fz son parecidos y que en cierto punto sus Re son prácticamente los mismos de hecho se cruzan las líneas. De la gráfica, también podemos observar que aquellos tubos con características geométricas similares presentan pendientes muy similares notándose claramente una diferencia. En el caso de $h/N \cdot D_i = 2$, que

son los tubos con menor elongación, la pendiente de estos casos es mucho más pronunciada y muy parecida en los tres casos. A diferencia en el caso de $h/N \cdot D_i = 3$, que son los tubos con mayor elongación, la pendiente es mucho menor y las líneas son casi horizontales. En el primer caso podemos concluir que estos tubos presentan mayor intensidad de turbulencia además de que lo logran a menor número de Fz por lo que se tendría un Re alto. En cambio, para el segundo caso, la intensidad de la turbulencia es prácticamente constante para rangos de número de Fz, por lo que podríamos modificar el Re sin tener un cambio significativo en la intensidad de turbulencia. Cabe aclarar que estas conclusiones deben tomarse con cierta medida ya que el número de tubos que se utilizaron para determinar las intensidades de turbulencia nos presentan datos muy diversos.

Por último, es importante tomar en cuenta que todo el trabajo fue experimental por lo que muchos errores pueden haberse cometido. Es necesario tomar los resultados e interpretarlos tratando de tomar todas las consideraciones importantes. Se pueden haber cometido errores sobretodo en la colocación del punto de medición sobre el punto real que se pretendía medir. También pueden haber habido errores de movimientos no contemplados, es decir que el tubo pudo haberse movido un poco. Otro error factible es el hecho del paralelismo con el que se medía, es decir el flujo debe ser completamente perpendicular a la sección de salida y los rayos del láser deben de ser completamente paralelos al flujo. En cuestiones del equipo y la computadora que se empleo para el experimento es difícil de que se pudiesen cometer errores ya que el equipo funciona automáticamente y en caso de detectar alguna falla en algún aspecto como puede ser desalineación, movimiento en el momento de efectuar la medición y falta de partículas, la computadora tardaría mucho en medir y en algunos casos hasta tendríamos mensajes de error.

RECOMENDACIONES

Es muy importante tener en consideración, que los resultados que se encuentran en las gráficas representan exclusivamente el experimento realizado, por lo que las conclusiones presentadas anteriormente son particulares. En otras palabras el trabajo desarrollado se encuentra dentro de ciertos límites, por lo que no es válido extrapolar resultados. Sería de gran utilidad, que se profundizará el tema para poder llegar a conclusiones más generales que abarcarán de mejor manera el trabajo con este tipo de dispositivos.

REFERENCIAS

1. Nandakumar, K. and Masliyah, J. "Swirl Flow Generated by Twisted Pipes and Tape Inserts." Encyclopedia of Fluid Mechanics, Canada, 1985.
2. Kern D. Q. Procesos de Transferencia de Calor. México, Ed. Continental, 1965.
3. Allen T., Ditsworth R. Fluid Mechanics. Japón, Edición Estudiantil, Ed. Mcgraw Hill, 1972.
4. Hunter Rouse. Elementary Mechanics of Fluids. Nueva York, Ed. John Wiley & Sons, 1960
5. Watrasiewicz B. M., Rudd M. J. Laser Doppler Measurements. Londres, Ed. Butterworth, 1976
6. Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. México, Ed Harla, 1982.
7. White Frank. Mecánica de Fluidos. México, Ed. Mgraw Hill 1993.
8. Streeter V., Wyle B. Mecánica de los Fluidos. México, Ed. Mgraw Hill, 1988.
9. Durst F., Melling A., Whitelaw J. Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry. Inglaterra, Ed. Academic Press, 1981.
10. Thompson D., Stevenson W. Laser Velocimetry and Particle Sizing. Estados Unidos, Ed. Hemisphere Publishing Corporation, 1979.

11. Wolfgang Gregor. "Limits Imposed on the Concentration and Size of Tracer Particles in Laser-Doppler Anemometry." Measurement and Analysis, No 22, Disa Information, Dec. 1977.

12. Incropera F., De Witt D. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Estados Unidos, Ed. John Wiley & Sons, 1990.