

2eje



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



VALIDACION DE UN INSTRUMENTO DE
MEDICION DE FLUJO DE AIRE
(Anemómetro de Hilo Caliente)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A :

MICHEL FARELL BARIL

Asesor: Rosalía Meléndez Pérez
Co-Asesor: Rafael Fernández Flores

Cuautitlán Izcallí, Estado de México 1994.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVANZADA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN

Departamento de
Exámenes Profesionales

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLÁN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

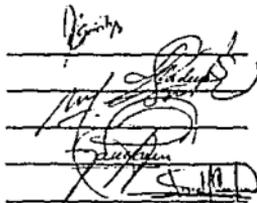
Validación de un Instrumento de Medición de Flujo de aire
(Anemómetro de Hilo Caliente)

que presenta el pasante: Michel Farell Baril
con número de cuenta: 8653219-8 para obtener el TÍTULO de:
Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 19 de Noviembre de 1993

PRESIDENTE Ing. Juan R. Garibay Bermudez
VOCAL I.A. Alfredo Alvarez Cárdenas
SECRETARIO I.A. Rosalía Meléndez Pérez
PRIMER SUPLENTE Dr. José Luis Ariona Román
SEGUNDO SUPLENTE I.A. Laura M. Cortazar Figueroa



Dedicada a Manis

**Por el apoyo a este trabajo
y a todos mis proyectos**

"Sepa usted, si no lo sabe"
dijo el que nada sabía,
a todo aquel falto de juicio,
que por poco le creía.

De "Las crónicas de Bruno del Breñal"
Fernando Delgadillo.

Gracias a Angelina:
por sus apuros y cabriolas.

Gracias a todos mis hermanos (as),
Corsarios o no, (que son muchos y
no caben para mencionarse)
por el apoyo y las fiestas.

Gracias a mi Padre, por
ser el modelo de ingeniero y
persona que quiero alcanzar

Gracias especiales a Rosalia,
por sacar adelante este trabajo.

Gracias a Ana María Aguirre, por crearme
interés en la carrera y al
Dr. José Luis Arjona, por devolvérmela.

Y gracias a todos los buenos profesores
que permanecen

Validación de un instrumento de medición de
flujo de aire (Anemómetro de Hilo Caliente)

Indice

Indice

Introducción

Resumen

I.- Generalidades

1.- Principios de transferencia.....	1
1.1.- Principios de transferencia de calor....	7
1.2.- Principios de transferencia de momento.....	10
1.2.1.- Presión de un fluido.....	11
1.2.2.- Viscosidad de los fluidos.....	11
1.2.3.- Transferencia de momento en un fluido.....	15
2.- Anemometría.....	16
2.1.- Medidores de presión.....	16
2.2.- Medidores de caudal y velocidad.....	19
2.3.- Clasificación de anemometría.....	21
3.- Anemómetro de hilo caliente.....	25
3.1.- Principios generales de funcionamiento.....	25
3.1.1.- Principio general de la medida por la disipación de la energía....	25
3.1.2.- Estudio de la energía proporcionada.....	26
3.1.3.- Estudio de la energía disipada....	27
3.1.3.1.- Estudio semi-empírico de la transferencia de calor de un hilo de longitud finita.....	28
3.1.3.2.- Expresión de la energía disipada.....	32

3.1.4.- Ecuación general de balance de energía.....	33
3.2.- El anemómetro a temperatura constante.....	35
3.3.- Contaminación de las sondas.....	38
4.- Validación de instrumentos de medición.....	39
4.1.- Técnicas de validación.....	39
4.1.1.- Exactitud.....	39
4.1.2.- Precisión.....	40
4.1.3.- Repetibilidad.....	40
4.1.4.- Reproducibilidad.....	40
4.1.5.- Linearidad.....	40
4.2.- Técnicas estadísticas utilizadas en validación.....	41
4.2.1.- Coeficiente de variación.....	41
4.2.2.- Pruebas de hipótesis.....	41
4.2.3.- Análisis de bloques aleatorios.....	42
4.2.4.- Análisis de covarianza.....	42
4.2.5.- Regresión lineal.....	42
4.3.- Técnicas estadísticas especiales.....	43
4.3.1.- Prueba de bondad de ajuste.....	43

II.- Metodología.

1.- Objetivos.....	44
1.1.- Objetivo general.....	44
1.1.1.- Objetivo particular 1.....	44
2.- Cuadro metodológico.....	45
3.- Descripción del desarrollo metodológico.....	46
4.- Resultados y Análisis de resultados.....	48

Conclusiones y Recomendaciones.....	60
-------------------------------------	----

Bibliografía

Indice de figuras

*Figura 1:	Manómetro diferencial.....	15
Figura 2:	Placa de orificio.....	18
Figura 3:	Tubo de Prandtl.....	21
Figura 4:	Esquema del diagrama eléctrico del anemómetro de hilo caliente.....	26
Figura 5:	Sonda del anemómetro de hilo caliente.....	40
Figura 6:	Diagrama de posiciones del A.H.C. y tubo Pitot.....	50
Figura 7:	Serie 7.....	54
Figura 8:	Serie 4.....	56
Figura 9:	Todas las series.....	58
Figura 10:	Deriva térmica.....	60
Figura 11:	Serie promedio.....	62
Figura 12:	Tubo Pitot.....	64
Figura 13:	Coefficiente de variación.....	68
Figura 14:	Tubo Pitot y A.H.C.....	73
Figura 15:	Relación de velocidad y voltaje.....	74

Resumen

Este trabajo forma parte de un programa que comprende la revisión, ajuste y validación de equipos e instrumentos de medición de temperatura, presión y flujo, así como el control de equipos y procesos para los laboratorios experimentales multidisciplinarios IV y V de la UNAM FES Cuautitlán.

En la industria de los alimentos existen una gran variedad de procesos, tales como congelación, refrigeración, esterilización, secado, o pre-enfriamiento, por mencionar algunos, dentro de los cuales se requieren técnicas de control. La importancia que reviste para la ingeniería de los alimentos la capacidad de medir las propiedades físicas de un fluido, como son temperatura, velocidad o concentración, en un punto dado es evidente.

Por esto en el presente trabajo se aplicaron las técnicas estadísticas de la validación a estos anemómetros, dando así la confiabilidad con la que se puede medir tanto la temperatura, la concentración de algunos componentes, como la velocidad del aire, aunque este trabajo se limitó exclusivamente a la medición de velocidades de aire, no siendo exclusiva su aplicación a esta.

Comparando la técnica del anemómetro de hilo caliente con otra técnica de principio diferente y conocido, se demostró experimentalmente que es: repetible, precisa, lineal y reproducible y por tanto válida.

El ingeniero deberá decidir cuando es necesaria y fundamental esta técnica para alcanzar sus objetivos, siendo consciente de sus limitaciones y alcance en base a sus principios, validando su funcionalidad para patrones de aire.

Introducción

En la industria de los alimentos existen una gran variedad de procesos, tales como congelación, refrigeración, o pre-enfriamiento, esterilización y secado, por mencionar algunos, dentro de los cuales se requieren técnicas de control. Es en este punto donde cabe señalar, con un ejemplo, la importancia que reviste para la ingeniería de los alimentos la capacidad de medir las propiedades físicas de un fluido, como son temperatura o concentración, o las propiedades del flujo, como es la velocidad, en un punto dado dentro de un proceso de transformación.

En el caso del secado por aspersión es donde se verifican procesos de transferencia de calor, masa y momento en solo unos segundos, el tiempo de residencia y las etapas del secado son muy cortas y solo se pueden seguir y predecir teóricamente (28).

El sistema de secado hace imposible seguir el proceso con anemómetros o termómetros comunes, ya que estos carecen de la velocidad de respuesta necesaria o alteran el patrón de flujo, o líneas de corriente, y por lo tanto alteran también a la trayectoria de las partículas a secar. También, en el caso de los anemómetros mecánicos su tamaño los hace obsoletos para medir velocidades que puedan considerarse puntuales; se requiere de una sonda pequeña que no altere estas trayectorias de manera drástica, y que lea los cambios de las propiedades en un punto del fluido con la rapidez necesaria (22), (28).

Es uno de los requisitos para el diseño de estos secadores el poder predecir la posición y la trayectoria de una partícula, suponiendo a esta similar a las líneas de corriente en el secador; asociadas estas a las concentraciones de humedad y tiempos de residencia se puede así predecir, calcular y diseñar las mejores condiciones del proceso (28).

Se sabe que el anemómetro de hilo caliente puede

operar dentro del secador para entregar velocidades puntuales de aire, a diferencia de otros anemómetros, que debido a su tamaño, resultan imposibles de operar dentro de la cámara de secado. Se sabe también que el anemómetro de hilo caliente es capaz además de medir temperaturas con precisión, así como los cambios de concentración en el flujo. De esta manera, y gracias a estos aparatos, se tienen herramientas para el estudio de una de las operaciones unitarias más complejas de la ingeniería, como es el secado por aspersión.

Así como en este ejemplo, sobre una operación y con un tipo de equipo particular, el ingeniero deberá decidir cuando es necesaria y fundamental esta técnica para alcanzar sus objetivos, siendo consciente de sus limitaciones y alcance en base a sus principios, validando su funcionalidad para patrones de aire.

Por esto el presente trabajo pretende aplicar el concepto de la validación a estos anemómetros, dando así la confiabilidad con la que se puede medir tanto la temperatura, la concentración de algunos componentes, como la velocidad del aire en un secador, este trabajo se limita exclusivamente a la medición de velocidades de aire, no siendo exclusiva su aplicación a este proceso de transformación vista como operación unitaria.

La técnica de anemometría de hilo caliente se conoce y se practica desde principios de los años '50, este trabajo no tiene por objetivo demostrar lo conocido, sino dejar el precedente de la metodología para los posteriores estudios de validación de instrumentos aplicados a la investigación en los Laboratorios Experimentales Multidisciplinarios de la U.N.A.M. F.E.S. Cuautitlán.

I. - Generalidades.

1. - Principios de Transferencia.

Se conoce como fenómenos de transferencia o de transporte, a cualquier flujo de una propiedad física a través de un medio.

La existencia de una diferencia en una propiedad física (calor, momento, masa o carga) dentro de un medio, provoca una fuerza impulsora que tiende a equilibrar a esta propiedad de nuevo, esto es, se genera un movimiento, que medido a través de una unidad de área y por unidad de tiempo, se le llama flujo. El medio puede variar en la facilidad con la que la propiedad física se mueve a través de él, a esto se le conoce como la resistencia del medio al flujo (26).

Los principales fenómenos de transferencia estudiados son, a saber, el flujo de fluidos, el de calor, la transferencia de masa y la de carga, y para la simplificación de este estudio se puede hacer en estado estable e inestable.

Todos estos fenómenos pueden expresarse de manera general por:

$$\text{Flujo} = -(\text{conductividad}) \times (\text{fuerza impulsora}) \quad (26)$$

Donde la conductividad con signo negativo representa la resistencia al flujo. Se mencionan a continuación las cuatro leyes básicas de estos fenómenos en estado estacionario:

a) Ley de Poiseuille:

$$Q_H = -K_H P / z$$

Aquí el flujo de un fluido (Q_H) se ve impulsado por una diferencia de presiones (P), generadas por un sistema mecánico,

una diferencia de alturas, por calor, etc. resistiéndose a este impulso la fricción del fluido con su contenedor, $(-K_H)$, que bien puede ser la pared de una tubería [26].

b) Ley de Fourier:

$$Q_q = -K_q T / z$$

La energía, o calor, (Q_q) que fluye de la zona más caliente de un cuerpo a la más fría, propiamente debida a la diferencia de temperaturas (T / z) , se ve obstruida por la facilidad que encuentra el calor para moverse a través del cuerpo y la cantidad de energía que atraviesa un metro cuadrado en un segundo (K_q) [26].

c) Ley de Fick:

$$Q_D = -K_D C / z$$

De forma análoga, una diferencia de concentraciones de una sustancia produce una fuerza C / z , donde C es la concentración, que impulsa a las partículas de una sustancia a moverse a través de otra con menor o mayor facilidad; cuantificada por el coeficiente de difusión (K_D) . Estas magnitudes se relacionan con la cantidad de partículas que fluyen a través de un metro cuadrado en un segundo [26].

d) Ley de Ohm:

$$Q_E = -K_E V / z$$

donde:

z = Distancia.

V = Diferencia de potencial eléctrico.

Q_e es el flujo de electrones a través de una sección transversal de un conductor eléctrico por unidad de tiempo, (V/z) es la diferencia de potencial que genera la fuerza impulsora, y (K_e) es la conductividad eléctrica del conductor; el signo negativo expresa a ésta como una resistencia que se opone al flujo de electrones (26).

- Transferencia en estado estable.

Se mencionó anteriormente que los fenómenos de transferencia son estudiados, para su simplificación, en estado estable e inestable.

En caso de que una variable como el calor, la presión o la concentración, en cualquier punto del sistema, no cambie con el tiempo, se dice entonces que se tiene un estado estacionario o régimen permanente (3).

Cabe mencionar, que en este estado es en el que opera la industria la mayor parte del tiempo, como un medio de facilitar las operaciones y el control.

- Transferencia en estado inestable.

Si el gradiente de una variable es función de tiempo, se dice que el proceso se realiza en estado inestable o régimen transitorio.

Antes de que un proceso llegue a tener condiciones de estado estable debe transcurrir cierto tiempo desde que se inicia para permitir que desaparezca la condición transitoria (3).

La importancia del estudio de la transferencia en estado inestable es debida al gran número de estos problemas que existen en la industria. En los procesos es necesario predecir las velocidades de transferencia de diversos tipos de geometrías

con el objeto de estimar el tiempo requerido para alcanzar ciertas temperaturas o concentraciones. La concentración de agua en la destilación y en el secado es una variable en función del tiempo en procesos intermitentes, y se hace más crítica al principio y al final de la operación. En el procesamiento de alimentos, como la industria de conservas, los alimentos enlatados se calientan por inmersión en baños de vapor o se enfrían sumergiéndolos en agua. Todas estas operaciones, por ejemplo, han de llevarse a cabo en régimen transitorio de transferencia.

1.1.- Principios de transferencia de calor.

La transferencia de energía en forma de calor es muy común en procesos industriales y de laboratorio. Esta suele acompañar a varias operaciones unitarias tales como el secado, la destilación, o la evaporación, todas muy comunes en el proceso de alimentos.

La transferencia de calor se verifica debido a la fuerza impulsora de una diferencia o gradiente de temperaturas; el calor fluye de la región de alta temperatura a la de más baja temperatura. Esta transferencia de energía ocurre por tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

a) Conducción: Las moléculas que se mueven más rápido en la parte de más temperatura de un cuerpo comunican, mediante impactos, una parte de su energía a las moléculas adyacentes. El calor se conduce a través de sólidos, gases y líquidos.

La cantidad de energía transmitida por conducción esta dada por la ley de Fourier, publicada en 1822 (18),

$$Q/A = -k \delta T / \delta x$$

donde Q es el calor conducido por el área A o flujo de calor, debido al gradiente $\delta T/\delta x$, y $-k$ es una medida de la resistencia al flujo de calor que depende solo del material.

b) Radiación: El calor radiante consiste en ondas electromagnéticas con longitudes de onda del orden de 10^{-6} y 10^{-3} m. Todos los cuerpos radian calor, la transferencia ocurre porque un cuerpo emite mas energía de la que recibe (18).

La ecuación básica de la transferencia, desarrollada en 1874 por Stephan y derivada por Boltzmann en 1884, es:

$$Q/A = \sigma T^4 \quad (18)$$

donde " Q " es el calor radiado por un cuerpo de superficie " A ", a la temperatura absoluta " T ", siendo " σ " una constante.

c) Convección: Esta se lleva a cabo cuando un fluido en movimiento recoge energía de un cuerpo caliente y la lleva a un cuerpo frío. La convección implica la transferencia de calor por el movimiento de un fluido. Hay dos tipos de convección. La convección natural se da debido a la diferencia de densidades que se presentan por la diferencia de temperaturas y la convección forzada se da por medios externos, tales como ventiladores, agitadores, bombas, etc.

En 1701 Newton definió el calor transferido " Q " desde una superficie de un sólido, a temperatura " T_s ", a un fluido en movimiento con temperatura " T " por:

$$Q = h_c a (T_s - T) \quad \text{Ecc. 1 (18)}$$

donde " h_c " es el coeficiente de transferencia por convección. Debe tenerse en cuenta que este coeficiente esta en función, además de las propiedades físicas del fluido, del

régimen de flujo (laminar o turbulento) y de la geometría de las superficies sólidas con las que el fluido tiene contacto.

1.2.- Principios de transferencia de momento.

El flujo y el comportamiento de los fluidos revisten gran importancia en muchas de las operaciones de la ingeniería de proceso de alimentos. Un fluido puede definirse como la sustancia que no resiste de manera permanente la distorsión causada por una fuerza y, por lo tanto, cambia de forma (5).

En la industria de los alimentos, gran parte de los materiales están en forma de fluidos y deben almacenarse, bombearse, y procesarse por lo que resulta fundamental familiarizarse con sus principios. Los fluidos típicos para la industria de alimentos son el agua, su vapor, el aire, aceites, emulsiones, suspensiones, y jarabes. Si la densidad de un fluido es inapreciablemente afectada por los cambios de presión se dice que el fluido es incompresible. Los gases se consideran fluidos compresibles. Sin embargo si los gases se sujetan a intervalos de cambios de presión y temperatura pequeños sus cambios de densidad serán poco considerables y se les puede clasificar entonces como fluidos incompresibles (5), (9), (10).

El método más común para transportar fluidos de un punto a otro es impulsarlo a través de un sistema de tuberías. Muy pocos problemas de la mecánica de fluidos, como es el caso del flujo laminar por tuberías, pueden ser resueltos por métodos matemáticos convencionales; todos los demás problemas deben ser resueltos basándose en coeficientes y relaciones experimentales (3). Muchas fórmulas empíricas han sido propuestas como soluciones a diferentes problemas de flujo de fluidos por tuberías, pero son limitadas y pueden aplicarse solo cuando las condiciones del problema se aproximan a las condiciones de los experimentos de los cuales derivan las fórmulas (3). Se considera que los gases, los vapores y los líquidos tienen las características de fluidos y que obedecen muchas leyes comunes sobre sus propiedades físicas, como son: presión y viscosidad.

1.2.1.- Presión de un fluido:

La presión se define como una fuerza aplicada por unidad de área. En un punto cualquiera de un fluido, éste debe soportar todo el fluido que esté por encima de dicho punto. Se puede demostrar que en cualquier punto de un fluido inmóvil o estático las fuerzas son iguales en todas direcciones. Además, para un fluido en reposo, la fuerza por unidad de área o presión es igual en todos los puntos de una misma altura y puesto que lo que determina la presión de un fluido es la altura vertical del recipiente que lo contiene, su forma no afecta a aquélla (5).

La expresión fundamental para calcular la presión "P" de un fluido a cualquier profundidad "h" es:

$$P = \rho \cdot g \cdot h + P_0 \quad \text{Ecc. 2} \quad (5)$$

donde ρ = la densidad del fluido.

g = Cte. de la aceleración de la gravedad.

P_0 = Presión atmosférica sobre el fluido.

1.2.2.- Viscosidad de los fluidos.

Un sólido puede soportar esfuerzos normales de dos clases, llamados así porque la fuerza es normal al área que resiste la deformación, que son: de compresión y de tracción. Un fluido puede soportar los esfuerzos de compresión pero no los de tracción y esta es la diferencia con los sólidos.

Otras diferencias son que los sólidos y fluidos pueden estar sometidos a esfuerzos cortantes. En los fluidos la fuerza es paralela al área en que actúa. Todos los cuerpos se deforman

bajo la acción de las fuerzas cortantes a las que están sometidos, en los cuerpos elásticos la deformación desaparece cuando deja de actuar la fuerza, mientras que en la deformación plástica subsiste la deformación aunque desaparezca la fuerza deformadora. En los fluidos la deformación aumenta constantemente bajo la acción del esfuerzo cortante, aunque éste sea pequeño (3), (10).

El flujo es el desplazamiento de un fluido. A la resistencia de los líquidos y gases al flujo se le denomina viscosidad (5).

Entre las moléculas de un fluido existen fuerzas moleculares de atracción que se denominan fuerzas de cohesión. Por otra parte, entre las moléculas de un fluido en contacto con las de un sólido, como puede ser el recipiente, existen fuerzas moleculares llamadas de adherencia. La cohesión y la adherencia generan una fricción entre las moléculas del propio fluido y también con las del sólido que le contiene. La resistencia del fluido al flujo no es otra cosa mas que esta fricción, con las paredes del recipiente o tubería y la propia fricción interna. Al coeficiente de fricción interna se le denomina viscosidad y se designa por el símbolo de " μ " (3), (5), (10).

Cuando un fluido entra en movimiento, se presentan dos tipos de flujo: laminar y turbulento, dependiendo de la velocidad de dicho fluido. A velocidades bajas, el fluido tiende a fluir sin mezclado, y las capas adyacentes se deslizan unas sobre las otras. En este caso no hay corrientes perpendiculares a la dirección del flujo, ni tampoco remolinos de fluido, a este tipo de flujo se le llama laminar. A velocidades más altas se forman remolinos, lo que conduce a un mezclado lateral, a este régimen se le llama turbulento (3).

Supóngase un fluido encerrado entre dos placas paralelas infinitas y que la placa inferior se desplaza paralelamente a la superior y a una velocidad constante " v " mayor que la placa superior, debido a la aplicación de una fuerza uniforme " F ". Las

placas tienen una separación "y".

Todas las capas se desplazan en la dirección "z". La capa directamente adyacente a la placa inferior se desplaza a la velocidad de dicha placa. La capa que sigue se desplaza a una velocidad menor, y cada una de ellas tiene una velocidad un poco menor que la anterior al recorrer el fluido en dirección "y" (3).

Newton determinó en forma experimental para muchos fluidos que la fuerza "F" es directamente proporcional a la velocidad "v", al área de la placa "A", e inversamente proporcional a la distancia "y" que separa las placas. Expresada como la ley de la viscosidad de Newton, cuando el flujo es laminar:

$$F/A = \mu v / y \quad \text{Ecc. 3} \quad (5)$$

Donde μ es la constante de proporcionalidad. Cuando "y" tiende a cero y usando la definición de derivada:

$$\tau = -\mu \delta v / \delta y \quad \text{Ecc. 4} \quad (5)$$

Donde $\tau = F/A$ es el esfuerzo cortante o fuerza por unidad de área.

En tuberías este régimen laminar se caracteriza por el deslizamiento de capas cilíndricas concéntricas una sobre otra de manera ordenada. La velocidad del fluido es máxima en el eje de la tubería y disminuye rápidamente hasta anularse en la pared de la tubería. Conforme la velocidad dentro de la tubería se incrementa estas láminas continúan moviéndose en líneas rectas hasta que alcanzan una velocidad en donde las láminas comienzan a ondularse y se rompen en forma brusca y difusa, esto ocurre en la llamada velocidad crítica (3).

A velocidades mayores de la crítica, el régimen es turbulento (3). En el régimen turbulento hay un movimiento irregular e indeterminado de las partículas del fluido en

direcciones transversales y hasta opuestas a la dirección principal del flujo; la distribución de velocidades en el régimen turbulento es más uniforme a través del diámetro de tubería que en el laminar. A pesar de que existe un movimiento turbulento a través de la mayor parte del diámetro de la tubería, siempre hay una pequeña capa de fluido en la pared de ésta, conocida como capa periférica o subcapa laminar, que se mueve en régimen laminar (3), (5), (15).

a) Número de Reynolds: Las investigaciones de Oswald Reynolds han demostrado que el régimen de flujo en tuberías, laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, de la densidad del fluido, la viscosidad, y de la velocidad del flujo (3). El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables, conocido como número de Reynolds, puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad. Las fuerzas dinámicas están representadas por la inercia, producto de velocidad y densidad, y las fuerzas viscosas por la función de diámetro y viscosidad. Por definición el número de Reynolds es:

$$Re = Dv/\mu$$

Ecc. 5 (3)

b) Fluidos newtonianos y no newtonianos: Los fluidos newtonianos son aquellos que obedecen la ley de Newton (Ecc. 3 y 4), donde la viscosidad " μ " es una constante independiente al esfuerzo cortante o fuerza deformadora. Como ejemplo tenemos al agua o al aire que son dos de los fluidos de servicio y proceso mas importantes de la industria. Cuando un fluido no obedece la ecuación 3, se dice que es un fluido no newtoniano. En estas condiciones, una gráfica de " τ " contra la velocidad de corte no es lineal a través del origen (3).

Los fluidos no newtonianos pueden dividirse en dos categorías principales en base a su comportamiento esfuerzo cortante/velocidad de corte: fluidos en los que el esfuerzo

cortante es independiente del tiempo y aquellos en los que el esfuerzo cortante depende del tiempo o duración de la acción cortante. Además de su comportamiento anormal en la relación del esfuerzo cortante, algunos fluidos no newtonianos también tienen características elásticas que son una función del tiempo y como resultado de las cuales se les llama fluidos viscoelásticos. Estos fluidos exhiben esfuerzos normales perpendiculares a la dirección del flujo, además de los esfuerzos tangenciales usuales (5).

La mayoría de los fluidos alimenticios caen dentro de la categoría de los fluidos no newtonianos.

1.2.3.- Transferencia de momento en un fluido.

Las masas de fluido en movimiento llevan un momento debido a su velocidad y a su propia masa, este momento medido a través de un área y en función del tiempo se le denomina un flujo de momento (5).

El esfuerzo cortante de las ecuaciones 3 y 4 puede interpretarse como un flujo de momento:

$$\tau = (\text{Kg} \cdot \text{m/s}) / \text{m}^2 \cdot \text{s} = (\text{momento}) / \text{m}^2 \cdot \text{s}$$

Ecc. 6 (5)

2.- Anemometría.

La medida de caudales, la de presión y la de temperatura son las que se realizan con mayor frecuencia en la industria y en la investigación. Los ejemplos de sus aplicaciones son innumerables y esto explica el desarrollo extraordinario que ha sufrido esta tecnología en los últimos años y la variedad inmensa de instrumentos y procedimientos que se han desarrollado para la medida, transmisión, control y registro de flujos (10).

El conocimiento y la aplicación del principio de funcionamiento de las técnicas las hace multifuncionales.

Algunas de las técnicas existentes para medir velocidades medias de fluidos, velocidades puntuales así como flujos volumétricos, máscos y presiones son las siguientes:

2.1.- Medidores de presión.

La medición, la transmisión a distancia de la medida y el registro de presiones es muy frecuente tanto en laboratorios como en la industria, para la verificación de procesos y por seguridad del equipo y personal.

Los medidores de presión, llamados manómetros, necesariamente han de ser variadisimos debido a los intervalos también muy variados de las presiones que han de conocerse, que pueden ser desde el vacío absoluto hasta 10,000 bar y mayores, con precisiones y escalas diversas y adaptados además para los medios en que han de trabajar (11).

Por el principio de funcionamiento los manómetros se clasifican en a) mecánicos y b) eléctricos (12).

a) Los primeros hacen quedar en equilibrio las fuerzas generadas por la presión de un fluido con un mecanismo físico, como una columna de líquido en los tubos piezométricos, con un resorte, como en los manómetros de tubo Bourdon, o con la fuerza ejercida en la otra cara de un émbolo en los manómetros de émbolo; esto es, la fuerza ejercida por la presión se mide mecánicamente (11).

i) Manómetro diferencial: como su nombre lo indica, mide la diferencia de presiones entre dos puntos.

De la figura 1 se deduce que la expresión matemática reducida es:

$$P_1 - P_2 = l \cdot g (\rho_a - \rho) \quad \text{Ecc. B (11)}$$

Donde:

l = Diferencia de alturas.

ρ_a = Densidad del fluido manométrico.

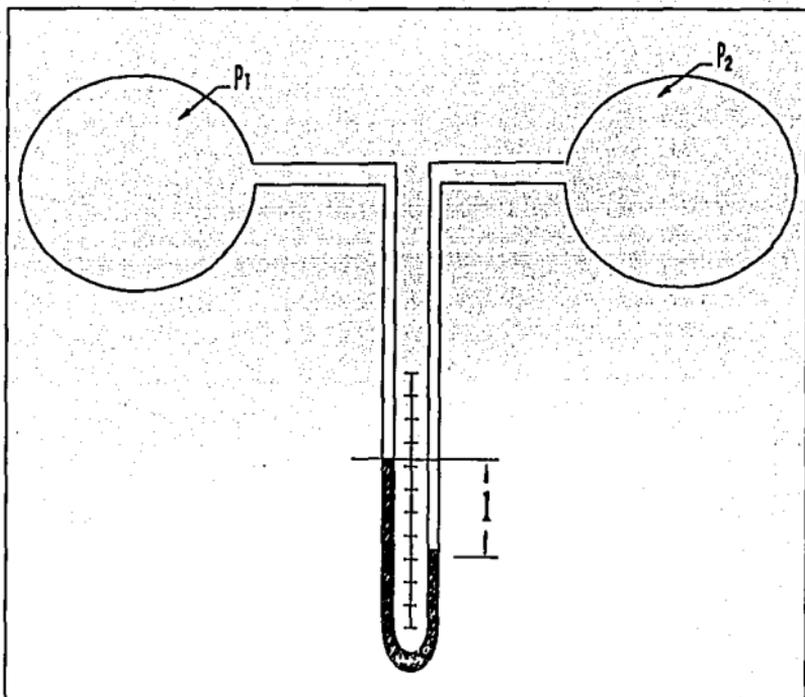
ρ = Densidad del fluido.

La diferencia de alturas "l", para una diferencia de presiones $P_1 - P_2$, será mayor mientras la densidad del líquido manométrico (ρ_a) sea mas parecida a la densidad del fluido (ρ), esto es, el manómetro será mas sensible (12).

b) Los manómetros eléctricos miden una deformación elástica causada por la presión y la convierten a impulsos eléctricos. Esto se consigue con transductores (7).

Los transductores son instrumentos que transforman energía de una clase, (presión causada por un fluido, por ejemplo) a energía de otra clase, (impulsos eléctricos) que guarda relación conocida con la primera a fin de poderla medir, transmitir y procesar mas fácilmente (13).

Existe una gran variedad de transductores que se han desarrollado, algunos con teorías muy sofisticadas (7).



P = Presión ($l > 0$)

l = Diferencia de alturas del fluido manométrico

Figura 1: Manómetro diferencial o tubo "U". (10)

Los transductores eléctricos de presiones son muy apropiados para la medición de presiones pequeñas o muy grandes, así como la medición de presiones instantáneas, que varían rápidamente con el tiempo. Sin embargo, y en general, la precisión de la medida es menor que la de los manómetros mecánicos (10).

Según el principio de funcionamiento, entre los transductores pueden existir los siguientes grupos:

i) De resistencia variable: También llamados potenciómetros de resistencia. Registran el desplazamiento lineal o angular de contacto sobre un alambre (10), (7).

ii) De capacidad: Aquí la distancia variable entre placas se registra como cambio de capacitancia (10), (7).

iii) De inducción: En estos aparatos una fuerza externa genera por inducción una corriente eléctrica (10), (7).

iv) De efecto Piezoeléctrico: La fuerza aplicada en la superficie de un cristal de cuarzo genera una diferencia de potencial con otro cristal similar, a esto se le conoce como efecto piezoeléctrico (10), (7).

v) Fotoeléctricos: La luz que incide en el transductor puede registrarse como corriente eléctrica, como disminución de la resistencia del material o como una diferencia de potencial (10), (7).

vi) De efecto magnético: Estos utilizan los efectos de los campos magnéticos (10), (7).

vii) Térmicos: Utilizan el principio de transferencia de energía calorífica con el medio para medir sus propiedades (27).

2.2.- Medidores de caudal y velocidad.

En el caso de los medidores de velocidad y caudal debe recordarse, que para la mayoría de los casos, existen ecuaciones que relacionan las velocidades puntuales y medias de un fluido, y con estas se puede obtener el gasto volumétrico o másico del fluido en estudio, por lo que la clasificación siguiente se basa sólo en las respuestas directas, principales o prácticas de las técnicas y mecanismos de medición. Por ejemplo, de un tubo Pitot se obtienen directamente presiones puntuales que se convierten a velocidades puntuales y de éstas se puede calcular la velocidad media del fluido, para relacionar así a ésta con los gastos másicos o volumétricos y, sin embargo, el tubo Pitot se clasifica aquí como un medidor de velocidades puntuales.

Una breve clasificación los podría dividir en:

a) Métodos de desplazamiento positivo: Por lo general éstos se utilizan para aquellas aplicaciones donde se desea alta exactitud en condiciones de flujo constante y son dispositivos mecánicos que trabajan en ciclos, ya sea impulsados por el propio fluido, como es el caso del medidor de disco oscilante, o por medios externos, como los medidores de aspas o el de lóbulos, donde el número de revoluciones de los rotores es una indicación del flujo volumétrico [1].

Los medidores de desplazamiento positivo dan lecturas con confianza de 1% hasta 0.5% [1].

b) Métodos basados en efectos de arrastre: Estos medidores utilizan la fuerza, o momento, que les puede transmitir un fluido en movimiento para convertirlo a una medida del caudal. Por ejemplo, el rotámetro utiliza esta propiedad de arrastre para hacer quedar en equilibrio estas fuerzas con las de peso y los medidores de turbina las usan para mover sus álabes [1], [12].

c) Métodos de obstrucción del movimiento de fluidos: Algunos tipos de medidores están comprendidos dentro de esta categoría. Algunas veces llamados medidores de columna, debido a que utilizan medidas de diferencia de presión en columnas de tubos piezométricos como indicación del caudal, ya que éste está en función de la presión (10).

Entre estos medidores se tiene el tubo de Venturi, las toberas de medida y las placas de orificio. Para estos medidores el error es de aproximadamente 2% (20). Las placas de orificio se explican a continuación.

Placa de orificio:

También conocida como diafragma, (Figura 2) es una placa de metal (bronce, acero inoxidable, etc.), que lleva un orificio circular de diámetro "d" concéntrico al eje de la tubería de diámetro "D". Por su sencillez de construcción son muy usadas para medir caudales tanto en líquidos como en gases. Su instalación resulta económica, pero causa pérdidas de presión relativamente altas en el sistema. La ecuación para cálculo del caudal en fluidos no compresibles es:

$$Q = C_d \cdot A_2 \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad \text{Ecc. 9 (11)}$$

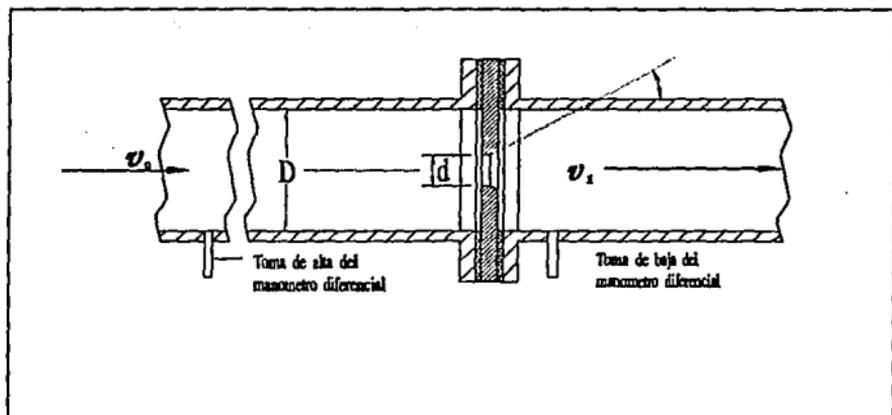
Donde:

C_d = Coeficiente de caudal. (Se obtiene experimentalmente por calibración o de tablas para medidas estandar (10)).

A_2 = Area de el orificio de la placa. (Normalizado (10))

$h_1 - h_2$ = Diferencia de alturas en el manómetro diferencial.

Q = Gasto volumétrico



v_0 = velocidad en el punto 0
 v_1 = velocidad despues de la reduccion
 D = Diámetro interno de la tubería
 d = Diámetro de el orificio de la placa

Figura 2 : Placa de orificio. (10)

2.3.- Clasificación de anemometría.

Un anemómetro puede ser cualquier instrumento que sirva para medir la velocidad de un gas, por ejemplo un tubo Pitot, pero el término se utiliza por lo general para las siguientes clasificaciones, aunque varios tipos de estos medidores no son exclusivos para gases, y pueden ser aplicados a otros fluidos (12). Además

a) Tubo Pitot: Este mide las velocidades locales o puntuales mediante la diferencia entre la presión de impacto o dinámica y la presión estática, de la forma:

$$v = [2g(P_d - P_e) / \rho]^{1/2} \quad \text{Ecc. 7 (11)}$$

donde:

P_d = Presión dinámica o de impacto N/m^2

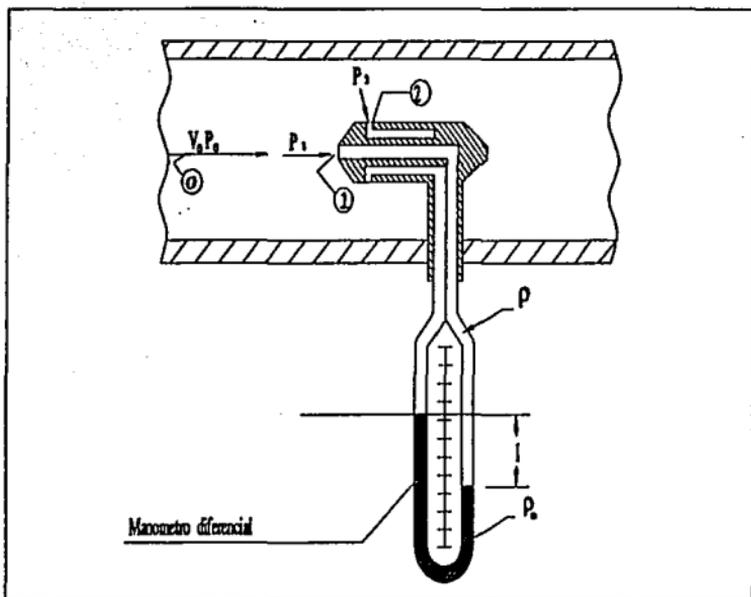
P_e = Presión estática N/m^2

ρ = Densidad del fluido Kg/m^3

El error de este medidor es de 1% aproximadamente (20). Existen además del tubo Pitot, muchas modificaciones y adaptaciones a este, como es, por citar alguna:

Tubo de Prandtl: Este es un instrumento que combina un tubo de Pitot y un tubo piezométrico, de manera que el tubo Pitot mide la presión dinámica, y el tubo piezométrico mide la presión estática y así, el tubo de Prandtl mide la diferencia entre las dos, que es la presión total o de estancamiento. Es utilizado en laboratorios de fluidos, siendo el instrumento más utilizado para medir la velocidad del aire en aerodinámica y el caudal y la velocidad en los ventiladores (18).

En la figura 3 se muestra el tubo de Prandtl introducido en una corriente de fluido de velocidad v_1 .



- P_0 = Presión de aire en el punto 0
 P_1 = Presión de impacto del aire
 P_2 = Presión estática del aire
 V_0 = Velocidad de aire en el punto 0
 l = Diferencia de alturas en el fluido manométrico
 ρ_s = Densidad del fluido manométrico
 ρ = Densidad del aire

Figura 3: Tubo de Prandtl. (10)

b) De eje vertical: Estos son utilizados en navegación, meteorología, y canales abiertos como ríos y canales de irrigación. El principio es el siguiente: cuatro o más aletas o cucharas dispuestas en los extremos de una cruceta dan origen al giro del eje vertical de la cruceta, cuando el fluido golpea los casquetes esféricos. La velocidad media del viento o agua es proporcional al número de revoluciones de la cruceta. Estos anemómetros miden velocidades de aire atmosféricas en la gama de 0.5 a 50 m/s. con una precisión de $\pm 2\%$ (12).

c) De eje horizontal: Estos son medidores de flujo con paletas o turbinas con eje de rotación paralelo y concéntrico a la dirección del flujo. De nuevo, el número de revoluciones del eje es función de la velocidad media del fluido. La gama de velocidades medibles con estos aparatos va desde 0.3 a 50 m/s y, por lo general, se restringen a fluidos limpios y no corrosivos. Por citar algunos de estos anemómetros se mencionan el de paletas y de turbina o molinete hidráulico (12).

d) Electromagnéticos: Estos utilizan algunas de las propiedades electromagnéticas de los cuerpos y fluidos para detectar indirectamente su velocidad. Este tipo de anemómetros, al no tener sondas en contacto físico directo con el fluido, ofrecen las ventajas de que no alteran el flujo durante el proceso de medición, al mismo tiempo que permiten mediciones cuantitativas muy precisas de las velocidades y características de flujo. Por otra parte, como los anemómetros térmicos tienen una respuesta rápida y son adecuados para medir fluctuaciones turbulentas de alta frecuencia. Por ejemplo el anemómetro laser hace incidir un rayo laser sobre un fluido en movimiento, y este dispersa parte del rayo, la luz dispersada experimenta un efecto Doppler en frecuencia directamente proporcional al flujo, pero el fluido debe de tener una cantidad mínima de partículas pequeñas que dispersen la luz. Otros medidores de esta clasificación son los medidores magnéticos de flujo, que funcionan bajo el principio del flujo de un fluido conductor, moviéndose dentro de un campo magnético. Ya que el fluido representa un conductor

moviéndose dentro de un campo, hay un voltaje inducido, y la longitud del conductor es proporcional al diámetro del tubo y la velocidad es proporcional a la velocidad media del flujo. Dos electrodos detectan el voltaje inducido, el cual puede tomarse como una indicación directa de la velocidad del flujo (7).

e) Visualización de flujo: Estas técnicas, al igual que las electromagnéticas, ofrecen la ventaja de que no alteran la corriente del flujo. En algunos casos las técnicas de visualización de flujo pueden emplearse como mediciones precisas de parámetros importantes del flujo, mientras que en otros casos pueden servir sólo para proporcionar información cualitativa, respecto al comportamiento global del flujo. El efecto básico óptico que se utiliza para el trabajo de visualización de flujo es este: considérese un rayo de luz que incide de manera perpendicular a un flujo, este rayo se deflexiona en un ángulo, como resultado de los gradientes de densidad del flujo y esta deflexión angular es proporcional al gradiente de densidad (7).

f) Térmicos: Estos medidores se refieren a pequeños elementos calentados eléctricamente y expuestos a un medio fluido con el propósito de medir propiedades de este medio (12).

Al exponer un elemento caliente a un fluido se presenta una transferencia de calor, por convección forzada principalmente, del elemento al fluido debida a la diferencia en las temperaturas de estos. Esta transferencia estará en función de las propiedades físicas del medio y del elemento térmico, de la geometría, y del régimen de flujo, además de la velocidad del fluido (7), (10), (12), (23).

La disipación del calor del elemento por el fluido puede ser una medida indirecta de la velocidad de este si las propiedades físicas del fluido se mantienen constantes y solo es la velocidad la que varía (23) (27).

Normalmente es la velocidad lo que estos aparatos miden, pero ya que son sensibles a la transferencia de calor del elemento al medio, puede relacionarse esta transferencia, además de a las velocidades puntuales, a los cambios de composición y a la temperatura del fluido, siempre y cuando las otras propiedades se mantengan constantes [7], [23], [27].

Sus intervalos de operación van desde 0.0009 m/s en aire, y 0.0002 m/s en agua, hasta velocidades supersónicas; además de ser capaces de detectar fluctuaciones de velocidad con frecuencias que ascienden a 200,000 ciclos/segundo [12].

Algunos de los anemómetros que entran en esta categoría son: el de hilo caliente, el de película caliente, de termopar calentado, y el anemómetro termistor [12].

3.- Anemómetro de hilo caliente.

3.1.- Principios generales de funcionamiento.

3.1.1.- Principio general de la medida por la disipación de la energía:

El anemómetro de hilo caliente puede considerarse como una aplicación particular de la técnica de medida por disipación de la energía en un transductor.

Bajo el principio de que una cierta energía "E" es proporcionada, durante una unidad de tiempo "t" a un elemento sensible (termorresistente) colocado dentro de un puente de Wheatstone (figura 4) y, al haber un fluido en movimiento alrededor del elemento termorresistente, una fracción "D" de esta energía es cedida durante el mismo tiempo a este fluido, sin embargo una fracción "A" es almacenada dentro del elemento resistente debido a su inercia térmica (Capacidad calorífica no nula) (23).

La manera en que se mide esta energía "E" proporcionada, fijará el tipo de funcionamiento del aparato, esto es, a Resistencia (temperatura) constante, o corriente constante (23), (7).

El estudio del proceso según el cual se efectúa la transferencia de calor fijará la naturaleza del objeto que se mide; por ejemplo, si el calor está siendo disipado debido a su transferencia a un fluido donde todas las propiedades son constantes excepto una, temperatura, velocidad o concentración, será esta propiedad la que al variar cambie el proceso o la manera en que se efectúa la transferencia del calor, y será, por lo tanto, esta la propiedad que se mida (23).

Finalmente el estudio de la relación $E=(A,D)$ precisará las condiciones en las cuales se realiza la medida; es decir, estado estable o de transición (23).

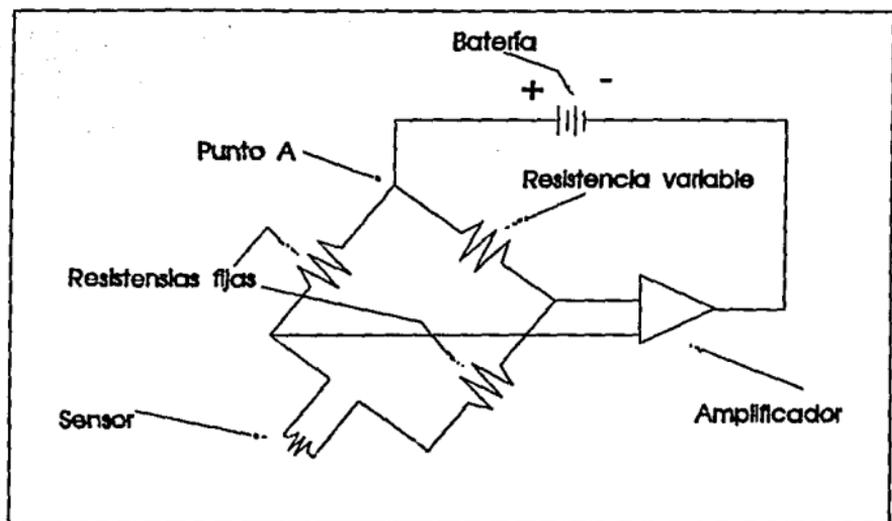


Figura 4: Esquema del diagrama eléctrico del anemómetro de hilo caliente (27)

3.1.2.- Estudio de la energía proporcionada:

La energía "E", que es proporcionada al captor, proviene del paso de corriente eléctrica dentro de un elemento termorresistente (hilo o película), es decir cuya resistencia varía con la temperatura según el material de este elemento.

La ecuación que representa esta relación se escribe:

$$(R-R_0)/R_0 = \alpha(T-T_0) \quad \text{Ecc. 10} \quad (23)$$

donde " α " es una constante en función del material. Por ejemplo, aunque existen muchas aleaciones, los dos materiales mas comunes son:

Platino: $\alpha = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (23)

Tungsteno: $\alpha = 5.2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (23)

R= Resistencia de operación

R₀= Resistencia de referencia

T= Temperatura de operación

T₀= Temperatura de referencia

El coeficiente $(R-R_0)/R_0 = (T_1-T_0/T_0)$ se llama, convencionalmente, coeficiente de sobrecalentamiento del hilo.

La temperatura se sitúa alrededor de 230 °c para un hilo de platino y 150 °c para uno de tungsteno (23).

Si se designa por I(t) el valor de la intensidad de corriente que recorre el hilo en el instante "t", cuya temperatura es T(t) y resistencia es R(t), definida según la ecuación 3.2, la energía proporcionada E(t) es:

$$E(t) = R(t) \cdot I^2(t) \quad \text{Ecc. 11} \quad (23)$$

o de otra manera:

$$E = R \cdot I^2$$

Ecc. 12

Esta es la ley de calentamiento de Joule que expresa la potencia radiada al medio ambiente por una resistencia "R" cuando le circula una corriente "I". Esta última relación indica que existen dos posibilidades de la medida de "E" y son: a) fijar el valor de "R" en uno constante $R(t)=R_f$ y medir $I(t)$, se obtiene entonces un aparato que funciona a resistencia, o temperatura, constante. O bien, b) fijar $I(t)$ a un valor constante " I_f " y medir $R(t)$, y se llega entonces un aparato que opera a intensidad constante (23), (27).

3.1.3.- Estudio de la energía disipada:

Se trata aquí exclusivamente el caso de un elemento sensible constituido por un hilo de sección recta y circular, tendido entre dos soportes. El estudio de la energía disipada se convierte, en estas condiciones, en el problema de la determinación de las características dinámicas y térmicas del flujo alrededor de un cilindro de longitud infinita (23).

Un punto importante que debe notarse es el intervalo de variación del número de Reynolds de 1 a 20, correspondiente al dominio subsónico incompresible, para el hilo caliente, que es el caso que se estudia aquí (23).

Parece lógico entonces buscar adaptar a un hilo de longitud finita las condiciones que se podrían, eventualmente, deducir del estudio del flujo alrededor de un cilindro para pequeños números de Reynolds.

El reporte de resultados relativos a las propiedades de flujo alrededor de un cilindro infinitamente largo muestra que, para el intervalo de números de Reynolds correspondientes al del hilo caliente en flujo subsónico incompresible, la solución

matemática no se conoce (23), (15). Esto se debe a que gran parte de este intervalo de números de Reynolds no se permite ligar el flujo a una u otra de las teorías asintóticas clásicas: movimiento rampante o capa límite (15).

Esta es la razón por la que un enfoque semi-empírico es la única posibilidad que se puede contemplar y aquí se estudia cómo esto permite deducir la expresión de la transferencia de calor del hilo caliente hacia el fluido (23).

3.1.3.1.- Estudio semi-empírico de la transferencia de calor de un hilo de longitud finita.

La cantidad de calor disipada por el fluido depende de un cierto número de parámetros relacionados: de las características del flujo (laminar, turbulento, compresible, etc.), de las propiedades físicas del fluido (densidad, viscosidad, c_p , etc.), de las características del hilo (longitud, diámetro, material, etc.), del coeficiente de sobrecalentamiento $(T_1 - T_0 / T_0)$ (23), (27), y de la inclinación o ángulo del hilo designada por " θ " (23). Los números dimensionales que se pueden construir con estos parámetros son numerosos, pero no todos se deben de tomar en cuenta, pues los efectos que ellos representan pueden ser de importancia relativa muy diferente sobre el intervalo del número de Reynolds que se estudia en el presente trabajo. Así, en el caso de la utilización clásica que se acaba de escoger, las suposiciones siguientes permiten limitar el número de variables:

a) El número de Match, que es la relación adimensional de la raíz cuadrada de la fuerza de inercia a la raíz cuadrada de la fuerza que tiene origen en la compresibilidad del fluido, es de gran importancia en los fluidos de elevada velocidad, donde las variaciones de densidad, debidas a la presión son significativas (15), (10).

$$Ma = (\rho v^2 / D)^{1/2} / (\rho c^2 / D)^{1/2} = v / c \quad (15)$$

donde:

Ma= Número de Match.

ρ = Densidad del fluido.

v= Velocidad del fluido.

D= Diámetro interno de la tubería.

c= Velocidad del sonido (10).

Debido a que los intervalos de velocidad con los que se trabaja están muy por debajo del flujo supersónico, los efectos de compresibilidad son despreciables, entonces el número de Match no es un parámetro significativo y no será tomado en cuenta (9).

b) La temperatura del hilo se establece alrededor de los 200°C, a lo máximo, y a ésta la transferencia de calor por radiación no representa sino el 0.005% del total de la energía transferida, por lo que sus efectos se consideran despreciables (18), (23).

c) El calor transmitido por conducción a los soportes del hilo es disipado también por el fluido, y el que se almacena en los soportes debido a su capacidad calorífica no nula es despreciable (menor al 0.1% del total) y es disipado también por el fluido en movimiento (27).

En estas condiciones, el flujo del calor transmitido al fluido está caracterizado por el número de Nusselt:

$$Nu = h D/k \quad \text{Ecc. 13 (18)}$$

depende para un hilo dado, de los parámetros adimensionales siguientes:

$$\text{Número de Reynolds: } Re = \rho v D/\mu \quad \text{Ecc. 14 (18)}$$

$$\text{Número de Prandtl: } Pr = cp \mu/k \quad \text{Ecc. 15 (18)}$$

$$\text{Número de Grasshof: } Gr = \beta g \int^2 L^3 (T_1 - T_2)/\mu \quad \text{Ecc. 16 (18)}$$

Es entonces la dependencia de esta transferencia

$$Nu = f (Re, Pr, Gr, T_1 - T_0 / T_0, \theta) \quad \text{Ecc. 17 [23]}$$

para un hilo de longitud L/d dada.

donde:

d = Diámetro del hilo.

$T_1 - T_0 / T_0$ = Coeficiente de sobrecalentamiento.

θ = inclinación o ángulo del hilo.

L = Longitud de la superficie o hilo.

h_c = Coeficiente de la transferencia de calor por convección.

k = Conductividad térmica del fluido.

ρ = Densidad del fluido.

μ = Viscosidad del fluido.

c_p = capacidad calorífica a presión constante.

g = Aceleración debida a la gravedad.

$T_1 - T_0$ = Diferencia entre temperaturas.

y β = Coeficiente de dilatación térmica del gas.

El número de Grasshof que representa la relación entre las fuerzas de inercia puede tener una influencia no despreciable, en el caso de que la transferencia de calor por convección natural sea importante. Resultados experimentales muestran que, a partir del momento en que el número de Reynolds es superior a 0.04, la transferencia se lleva a cabo exclusivamente por convección forzada y que en el intervalo de números de Reynolds entre 1 y 20 puede estar representado este hecho por una ley de la forma [18]:

$$Nu = f (Re, Pr, T_1 - T_0 / T_0, \theta) \quad \text{Ecc. 18 [23]}$$

La determinación de una expresión analítica explícita de "f" se hace según un doble procedimiento, estudiando: a) La influencia de los diferentes parámetros para una orientación de "θ", o ángulo fijo del hilo. En general esta orientación es tal

que el vector velocidad "U" sea, para una sonda de hilo recto, colineal al eje de la sonda y variable (23).

Y b) El efecto direccional asociado únicamente a la variación de orientación "θ", a velocidad "U" constante (23).

i) Estudio a orientación fija y módulo de velocidad variable: Una de las primeras y más sencillas expresiones propuestas para "f" es la de King (1914); una forma más elaborada es la que se debe a los trabajos de Kramer (1946); finalmente se toma en cuenta la ley de Collis y Williams (1959). Todas estas leyes clásicas agrupadas generan una expresión llamada Ley de King generalizada, que es:

$$Nu = A + BU^n$$

Ecc. 19 (23), (27)

Donde "U" designa el módulo del vector velocidad normal al hilo. Esta ley establecida empíricamente representa una primera aproximación, muy conveniente. Válida para un hilo normal al vector velocidad, los coeficientes "A", "B" y "n" dependen de manera más o menos compleja de las propiedades físicas del flujo y de las características geométricas y térmicas del hilo (23).

ii) Estudio con orientación variable y módulo de velocidad fija: Cuando se mantienen todos los parámetros constantes, en particular "U", y se hace variar únicamente la orientación de la sonda con relación a la dirección del flujo, por ejemplo, haciendo girar la sonda alrededor de un eje fijo pasando por el hilo, se comprueba una modificación en la transferencia de calor, que se convierte a una variación de la tensión de salida del anemómetro. Esta variación de energía disipada resulta de la perturbación aerodinámica y térmica que presenta la sonda, los broches y el hilo. Esta perturbación que resulta de la existencia de puntos de arista, que se imponen al flujo, se modifican entonces cuando estos varían con la orientación de la sonda,

trayendo de esta manera la modificación de las características dinámicas y térmicas de las capas límites que se desarrollan. Así el perfil longitudinal de las temperaturas a lo largo de un hilo no podría permanecer insensible a una rotación de la sonda alrededor de un eje que pasa por en medio del hilo y normal al plano de los broches (23).

El tomar en cuenta las propiedades direccionales de las sondas se efectúa sustituyendo el módulo del vector velocidad normal al hilo "U", ecuación 19, por el módulo de la velocidad efectiva de enfriamiento, denotada por " U_{eff} ", cuya expresión tendrá en cuenta los efectos anteriormente señalados (23) (27). Entre las expresiones existentes para U_{eff} se tomaron en cuenta las expresiones de La ley de los cosenos, La ley de Guitton-Gilmore, La ley de Friche y Schwartz, y la ley Kovasny y Fujita.

La ecuación general de la transferencia de calor, tomando en cuenta estas ecuaciones se escribe entonces:

$$Nu = A + B U_{eff}^n \quad \text{Ecc. 20} \quad (23)$$

Donde U_{eff}^n es el vector velocidad en función del ángulo que guarda con el hilo.

3.1.3.2.- Expresión de la energía disipada.

La energía en forma de calor, ecuación 13, que se transmite al fluido por el hilo es en cada momento, (siendo "a" el área de transferencia):

$$Q = d = h_c a (T_f - T_0) \quad \text{Ecc. 1} \quad (18)$$

Ahora, por definición, el coeficiente de transferencia de calor es tal que:

$$h = (L/d) Nu \quad \text{Ecc. 21} \quad (19)$$

y

$$a = \pi d^2 / 4$$

Ecc. 22

Utilizando la ecuación 20 del número de Nusselt y sustituyendo en l las ecuaciones 20, 21 y 22 se obtiene:

$$dD = \pi d L \int (T_f - T_0) (A + B U_{eff}^n) / 4 \quad \text{Ecc. 23} \quad (23)$$

Que es la energía disipada del sensor por el fluido.

3.1.4.-Ecuación general de balance de energía.

Designando

por "m" la masa del hilo, de capacidad calorífica "cp", la expresión de energía almacenada dA es:

$$dA = m cp \delta T_f \quad \text{Ecc. 24} \quad (24)$$

y designando por dD, dE y dA las variaciones respectivas de las diferentes energías durante el instante de tiempo "dt", se tiene:

$$dE = dD + dA \quad \text{Ecc. 25} \quad (25)$$

Ahora, sustituyendo las relaciones 12, 23 y 24 en la ecuación 25 se obtiene:

$$RI^2 = \pi L \int (T_f - T_0) (A + B U_{eff}^n) / 4 + (m cp \delta T_f) \quad \text{Ecc. 26} \quad (26)$$

Esta es la ecuación que convierte la igualdad entre la energía que se proporciona al hilo y la suma de la energía disipada por el aire y almacenada por el hilo en cualquier momento.

Utilizando entonces la expresión 10 que relaciona la variación de la temperatura a la variación de la resistencia, se

obtiene:

$$I^2 = \pi L \int (A + B U_{eff}^n) / 4\alpha (R - R_0/R_0R) + (m c_p / \alpha R_0 R) (dR/dt)$$

Ecc. 27 [23]

Esta ecuación constituye la ecuación fundamental que resume el principio de funcionamiento del anemómetro de hilo caliente, y muestra que la potencia producida por el efecto Joule es disipada por el fluido, salvo un término de inercia térmica.

En caso de que las variaciones de la disipación no provengan más que de las variaciones de velocidad del fluido, la ecuación de balance muestra que la medida de este parámetro se reduce a aquella de la potencia eléctrica proporcionada, a condición de no tomar en cuenta o de compensar la inercia térmica. El aparato es entonces un anemómetro, si el fluido es gaseoso, y se ha visto que según el modo seleccionado para medir esta potencia se distingue el aparato a intensidad constante, de aquel a temperatura, o resistencia constante.

No se debe olvidar, sin embargo, que la medición de la energía proporcionada (E), permite, en principio, conocer el valor de cualquier parámetro que afecta la disipación o transferencia de calor entre el elemento eléctrico y el medio, como es el caso de variaciones en la temperatura del medio, y la concentración, en el caso de mezclas.

Según los resultados de Kramer [23], [27], la ecuación de balance, para un régimen permanente, puede escribirse de la siguiente manera:

$$RI^2 = A + BU^n \quad \text{Ecc. 28}$$

$$\begin{aligned} \text{donde } A &= 0.42 \pi L \int (R - R_0 / \alpha R_0) p^{1/5} \\ B &= 0.51 \pi L \int (R - R_0 / \alpha R_0) J d / r p^{1/3} \\ \text{y } n &= 0.5 \end{aligned}$$

En la práctica, estas expresiones no se utilizan, y los valores de los coeficientes "A", "B", y "n" se determinan por calibración y no a partir de los valores propuestos por el autor (23).

Las relaciones analíticas entre la velocidad del fluido y las lecturas proporcionadas por el anemómetro pueden no ser requeridas. Las situaciones en las que la ecuación puede ser útil o necesaria son cuando las mediciones se hacen en flujo compresible, donde un juego completo de curvas de calibración es impráctico, o para investigar y corregir fuentes de error difíciles de aislar experimentalmente (27).

3.2.- El anemómetro a temperatura constante.

Tal como se ha mencionado anteriormente, el anemómetro a temperatura constante asegura la medida de la disipación de una fracción de la energía proporcionada al elemento sensible (12), debido a la transferencia de ésta al fluido en movimiento, manteniendo constante la temperatura y, entonces, la resistencia del elemento.

El diagrama fundamental de este aparato se esquematiza en la figura 4, y comprende tres partes esenciales:

a) Un puente de Wheatstone, en el cual una de las ramas es elemento sensible o hilo.

b) Un amplificador diferencial.

c) Un sistema de alimentación del elemento termorresistente.

El funcionamiento del conjunto es el siguiente: El papel del amplificador es controlar el sistema de alimentación del hilo, para que a cada instante inyecte en el punto "A" una corriente de intensidad conveniente " I_1 ", llevando el valor de la

resistencia del elemento sensible al valor "R". Existe una temperatura "T_f" tal que la resistencia "R" a esta temperatura satisface la condición de equilibrio del punto.

Supóngase, para empezar, que la velocidad del fluido "U" mantiene un valor constante durante el tiempo.

La potencia disipada del elemento, por un fluido de propiedades físicas y temperatura invariantes, permanece así constante durante este tiempo. Existe de esta manera un régimen de funcionamiento estable, donde la potencia proporcionada al hilo compensa exactamente la que se transmite a este fluido.

En este caso estando el puente en todo momento en equilibrio, la resistencia del hilo mantiene su valor de "R", debida a una corriente de intensidad "I" que la recorre y que se expresa por:

$$I^2 = (R - R_0 / R_0 R) (A + BU^n) \quad \text{Ecc. 29 (23)}$$

Ahora, sabiendo que :

$$V = I \cdot R \quad \text{Ecc. 30}$$

y que las resistencias se mantienen constantes, la ecuación 29 puede reescribirse también de la forma general:

$$V^2 = A + BU^n \quad \text{Ecc. 31 (23)}$$

Esto significa que el estudio del régimen estable del anemómetro a temperatura constante muestra que la medición de velocidad "U", se reduce a la medición de la tensión "V", en la cumbre del punto "A".

Suponiendo entonces la evolución de la velocidad "U" suficientemente lenta para que se pueda considerar cada valor como asociado a un estado de equilibrio, la ecuación $V = f(U)$ que resulta de esta evolución puede no ser lineal, como muestra la

relación 31 (23).

Un posible resultado de esta relación no lineal es la posibilidad de distorsión entre variaciones de tensión asociadas a variaciones de velocidad, debido a que estas últimas no tienen una amplitud suficiente (23).

El efecto de distorsión de fluctuaciones de gran amplitud, mencionado anteriormente, puede ejemplificarse cuando el mismo "U" corresponde a " V_1 " y " V_2 " desde el momento en que la curva " $V(U)$ " ya no puede ser asimilable localmente a su propia tangente (27).

Dada la evidencia de las dificultades que podrían resultar de la no linealidad de la relación tensión-velocidad, una manera de evitar estas consiste en linealizar esta relación, lo que se consigue agregando al anemómetro un dispositivo electrónico tal que la tensión de salida "V" sea de la forma:

$$V = A + k B^{1/n} \cdot U = kU + A$$

Ecc. 32 (23)

La respuesta en obra práctica indica que para la obtención de las constantes se necesita de una calibración del linealizador, según las condiciones representadas por la ecuación 32 (23), (27).

Se consigue así que la medición de la intensidad, o de la tensión "V", en la cúspide del puente, es decir en el punto "A", sea una medida del valor del agente disipador: la velocidad del fluido en el caso del anemómetro (23).

Ahora supóngase que la velocidad del fluido pasa bruscamente de el valor "U" al valor " $U_1 = U + u$ ", en el instante $t > t_0$, mientras que para todo instante $t < t_0$ este valor de velocidad es igual a "U".

En el instante "t", y antes de que el amplificador diferencial haya reaccionado, el puente ya no está en equilibrio.

En otros términos, la intensidad de corriente "I", que recorre a el elemento sensible no está adaptada a el nuevo valor de disipación. La temperatura del hilo, y entonces su resistencia, toman un nuevo valor " $R + r$ ", que tiende a restablecer el equilibrio energético de la transferencia. Aparece así una diferencia "r", que es el origen de la llamada "señal de error", que detectará el amplificador, y este a su vez, reaccionará para ordenar al sistema de alimentación que proporcione una nueva intensidad " $I + i$ " al hilo caliente. El valor de "i" debe ser tal, que la diferencia entre los bordes del amplificador diferencial desaparezca.

3.3.- Contaminación de las sondas.

Una sonda del anemómetro, figura 5, puede trabajar indefinidamente mientras el flujo sea limpio. Sin embargo, si existen partículas en el torrente algunas se adherirán al hilo y eventualmente éste se romperá, debido tanto al impacto de estas partículas así como a que un hilo cubierto pierde su dinámica dentro del flujo, el perfil que ofrece al fluido es mayor y por tanto mayor la carga o momento que se le transfiere hasta que su resistencia a estas tensiones se vea vencida (30).

Los reportes técnicos advierten también de un funcionamiento errático de las sondas cuyos hilos estén "sucios" antes de romperse, debido al aislamiento en el que se pueden convertir estas adherencias a la transferencia de calor del hilo al medio (30).

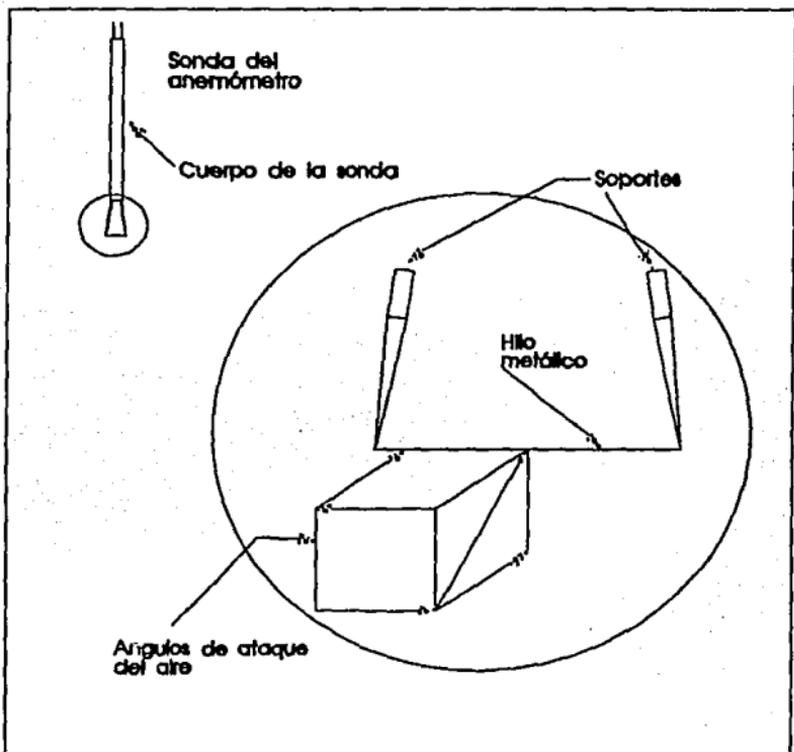


Figura 5: Sonda del anemómetro de hilo caliente (27).

4.- Validación de instrumentos de medición.

La validación es la técnica que permite establecer la confianza o validez del método, técnica o instrumento, permitiendo establecer la confiabilidad de las lecturas de un instrumento o de una técnica fundamentándose en la exactitud, precisión, repetibilidad, reproducibilidad, y comportamiento gráfico o linealidad de las mediciones que se evalúan cuantitativamente, apoyándose para éste efecto en técnicas estadísticas.

La calibración establece la exactitud de los instrumentos y su importancia radica en que permite verificar al instrumento contra un patrón o estándar conocido y reproducir, por lo tanto, los errores de exactitud. Los procedimientos de calibración implican una comparación del instrumento en particular con: a) Un patrón primario, como tablas o patrones estándar (Normas); b) Un patrón secundario, que puede ser otro aparato de exactitud conocida; o c) Una fuente de entrada conocida [7].

Se podría considerar que la calibración es parte de la validación, pero por lo general se le considera como el "ajuste" del instrumento [3].

4.1.- Técnicas de validación.

4.1.1.- La exactitud.

Es la proximidad de concordancia entre el resultado de una medición y el valor verdadero de la magnitud medida. En otras palabras la exactitud de un instrumento indica la desviación de una lectura con respecto a una entrada conocida. A esta desviación se le llama error. Es común expresar la exactitud como un porcentaje de la lectura de la escala completa o porcentaje de error. La exactitud puede mejorarse por

calibración pero no mas allá de la precisión del instrumento (7)(31).

4.1.2.- La precisión.

La precisión de un instrumento indica la capacidad de reproducir cierta lectura con una exactitud dada (7). Esta no es sinónimo de repetibilidad, sino que es la cualidad que caracteriza la aptitud de un instrumento de medición en dar indicaciones próximas al mismo valor de una magnitud medida (31).

4.1.3.- Repetibilidad.

Es la precisión de un método analítico expresado como la coincidencia obtenida entre determinaciones independientes, realizadas por por un mismo analista, usando los mismos aparatos y técnicas. Puede expresarse cuantitativamente como una característica de la dispersión de los resultados (31).

4.1.4.- Reproducibilidad.

Es el criterio que evalúa la capacidad presentada por un instrumento de tener un comportamiento indistinto en diferentes mediciones, esto es, la confianza que existe en un instrumento cuando, después de una calibración bajo condiciones dadas, se somete éste a mediciones en otros medios, es operado por otros analistas, en diferentes días, en el mismo y/o diferentes laboratorios, utilizando el mismo y/o diferentes equipos (31).

4.1.5.- Linearidad.

Es la característica que se presenta cuando los valores de la variable independiente se relacionan con

la dependiente de acuerdo a la ecuación de la línea recta (31).

La sensibilidad de un instrumento es la razón del movimiento lineal del indicador del mismo al cambio de la variable medida que causa este movimiento (7).

4.2.- Técnicas estadísticas utilizadas en validación.

4.2.1.- Coeficiente de variación.

También conocido como coeficiente de dispersión. Este coeficiente es una manera de medir la variación absoluta de los datos, generalmente expresado en porcentaje de la variación, es adimensional y por lo tanto independiente de las unidades, lo que lo hace útil para comparar distribuciones donde las unidades pueden ser diferentes, este se aplica en las pruebas de precisión y reproducibilidad (31).

4.2.2.- Pruebas de hipótesis.

Es una técnica en donde con un nivel de significancia dado (90, 95 o 99% de confianza y dependiendo si la prueba es uni o bilateral) se puede aceptar o rechazar una hipótesis de igualdad de medios.

Cuando se establece un procedimiento de prueba para investigar, estadísticamente, la factibilidad de una hipótesis enunciada, existen muchos factores que deben ser considerados, como pueden ser:

1) La naturaleza del experimento que producirá los datos (11) (31).

2) La prueba estadística debe ser seleccionada. Esto es, el método para analizar los datos (11).

3) El tamaño de la muestra, o número de veces que se efectúa el experimento (19), que es importante para utilizar los niveles de significancia dados por "t", distribución "t" de student o por "z", distribución Normal (31).

Esta prueba se utiliza para contrastar exactitud.

4.2.3.- Análisis de bloques aleatorios.

En este análisis las unidades experimentales se distribuyen en grupos o bloques, de manera tal que las unidades experimentales dentro de un bloque sean relativamente homogéneas y que el número de unidades experimentales dentro de un bloque sea igual al número de tratamientos por investigar (14). Aunque sigue considerándose como análisis de varianza de doble vía (31).

Los tratamientos se asignan al azar a las unidades experimentales dentro de cada bloque y se determina si existen diferencias entre ellos, que es lo que se quiere probar (31).

La repetibilidad de la técnica es lo que se evalúa con esta prueba.

4.2.4.- Análisis de covarianza.

Este es una medida de la variabilidad conjunta de X y de Y. De esta manera, la covarianza es una medida de asociación entre los valores de X y de Y y sus respectivas dispersiones (2).

4.2.5.- Regresión lineal.

Al buscar la relación entre variables, además de conocer la función matemática se desea saber

qué describe esta relación, se desea saber también con qué precisión se puede predecir el valor de una variable si conocemos los valores de la variable asociada. Las técnicas utilizadas para lograr estos dos objetivos se conocen como métodos de regresión y métodos de correlación. Los métodos de regresión se usan para determinar la mejor relación funcional entre las variables mientras que los métodos de correlación se utilizan para medir el grado de asociación de las distintas variables (11).

4.3.- Técnicas estadísticas especiales.

4.3.1.- Prueba de bondad de ajuste (Ji cuadrada).

Esta prueba se emplea para determinar de qué forma, distribuciones teóricas tales como normal, binomial, etc., se ajustan a distribuciones empíricas, es decir, aquellas que se obtienen de los datos muestrales (16).

El procedimiento consiste en hacer comparaciones entre el número real de observaciones y el número esperado de las mismas (11).

La prueba de normalidad se realizó con un análisis de Ji cuadrada.

II.- Metodología.

1.- Objetivos.

1.1.- Objetivo General:

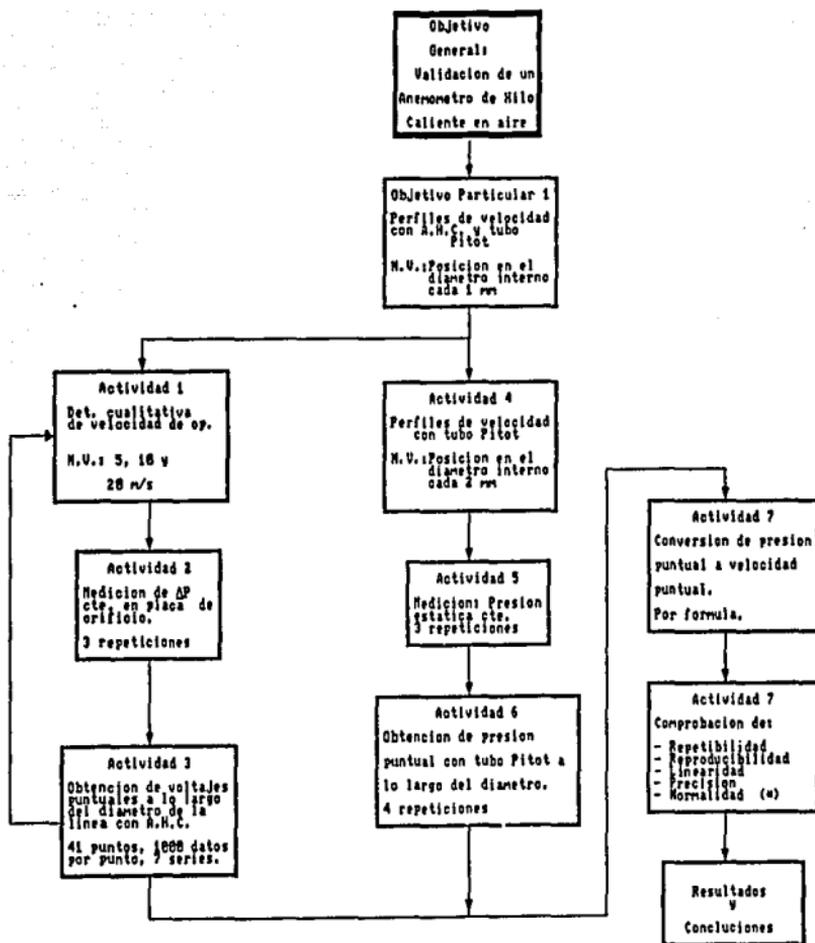
Aplicación de las técnicas estadísticas de validación sobre los datos obtenidos del anemómetro de hilo caliente en aire dentro de una tubería circular, para establecer la confiabilidad del instrumento de medición.

1.1.1.- Objetivo Particular 1.

Determinación de perfiles de velocidad con el anemómetro de hilo caliente para su comparación con perfiles obtenidos con tubo Pitot.

2.- Cuadro metodológico.

2.- Cuadro Metodológico



(*) Las pruebas de validación no incluyen Normalidad y si exactitud.

N. V.: Niveles de variación.

3.- Descripción del desarrollo metodológico.

La instalación experimental, que se encuentra montada en el Centro de Investigación Multidisciplinaria (C.I.M.) de la UNAM-FES-Cuautitlán, detallada esta previamente en el artículo del boletín IIE de enero/febrero 1989 "Instalación para el estudio experimental de flujos bifásicos agua-aire" (23), sin embargo, ésta ha sido modificada. Las modificaciones que ha sufrido la instalación son descritas en otros trabajos de tesis.

El inicio de la fase experimental consistió en la determinación cualitativa de la velocidad media apropiada para la operación del equipo, de manera que se obtuvieran: a) caídas de presión altas para asegurar precisión en los manómetros diferenciales, y b) velocidades bajas que permitieran la operación del hilo durante largos periodos de tiempo, sin que éste se dañara por un caudal demasiado impetuoso; de manera que se probaron tres niveles: alto, 20 m/s, medio, 10 m/s y bajo, 5 m/s. Estos niveles se revisaron con un anemómetro de paletas. Se revisó además el equipo para evitar variaciones y errores experimentales.

Una vez seleccionado un nivel de operación en la velocidad de aire, se registró cuantitativamente la velocidad promedio en milímetros de agua usando la placa de orificio conectada a manómetros de U, para poder así controlar las siguientes fases de la experimentación.

Luego, y tomando como referencia la caída de presión en la placa de orificio, se hicieron las mediciones de velocidades puntuales, en volts, con el anemómetro de hilo caliente, se realizaron 7 series o repeticiones en idénticas condiciones a lo largo del diámetro de la línea, en 41 puntos de este diámetro y con 1000 datos por punto; esto fue debido a que el equipo electrónico permite tomar 41,000 datos en 10 minutos, aproximadamente. Así es que en cada uno de los 41 puntos de las

series o perfiles se promediaron mil repeticiones, la figura 6 muestra estas posiciones dentro del diámetro interno.

Se continuó con la medición de la presión estática en milímetros de agua, con manómetros U, en orificios piezométricos de la red, para luego medir la presión dinámica con tubo Pitot conectado a un manómetro U, a través del diámetro de la tubería cada 2 milímetros, a fin de registrar el perfil de presiones dinámicas pero en 21 puntos. Todas estas mediciones se hicieron comenzando en una pared del tubo para terminar en la pared opuesta, y con cuatro repeticiones, exactamente a la misma caída de presión en la placa de orificio registrada para el anemómetro de hilo caliente, la figura 6 muestra estas posiciones.

Se convirtieron después los datos de presión dinámica puntual y presión estática, obtenidos con el tubo Pitot y orificios piezométricos, a velocidades puntuales y se hizo su graficación en función a la posición en el diámetro de la tubería, y se graficaron además los datos de voltaje contra la posición en el diámetro de la línea.

Después se realizó el tratamiento estadístico de los datos y graficación de voltaje, del anemómetro de hilo caliente, y de velocidad puntual, del tubo pitot, en función a la posición, para su comparación. Se procedió luego a hacer la calibración del anemómetro contrastando los datos de voltaje en función a los datos de velocidad del tubo Pitot, linealizar y obtener así las ecuaciones empíricas.

Con estos datos se comprobó, para validar el anemómetro: repetibilidad, con un análisis de bloques aleatorios completo, la precisión con un análisis de coeficiente de variación (14), la reproducibilidad con un análisis de coeficiente de variación aplicado a los datos reproducidos, la linealidad evaluada con la ecuación de la recta de la gráfica de velocidad del aire medida con tubo Pitot Vs voltajes del anemómetro de hilo caliente (14).

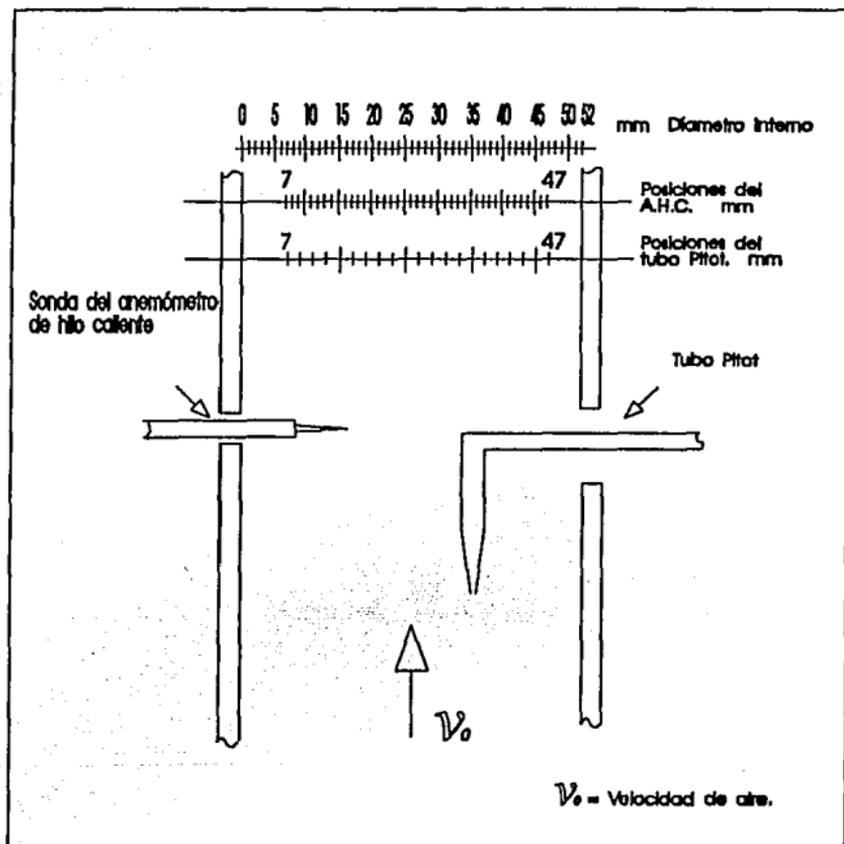


Figura 6: Diagrama de posiciones del A.H.C. y tubo Pitot

Se propuso además una prueba de normalidad de las curvas que, aunque no es una prueba estándar de validación, se propone en este caso a fin de comprobar la simetría del perfil de velocidad. De ser una curva normal, los puntos obtenidos en una mitad de esta son equivalentes a los de la segunda mitad, sin embargo, dado que la instalación experimental presenta algunas anomalías peculiares debido al diseño para la entrada de sondas y del tubo Pitot, éstas curvas tuvieron variaciones, que pueden hacerla una curva no normal. La prueba de normalidad se realizó con un análisis de Ji cuadrada.

No se realizó una prueba de exactitud debido a que ésta debe hacerse comparando los datos experimentales contra una fuente conocida (7), sin embargo, esta entrada es el tubo Pitot, que es también el patrón con el cual se calibró el anemómetro, por lo tanto la prueba de exactitud rendiría al final resultados de 0% de error.

4.- Resultados y análisis de resultados.

Se analizan en este capítulo los resultados más relevantes y representativos, además de presentarse también las figuras y cuadros correspondientes.

a) Determinación de perfiles de velocidad con el anemómetro de hilo caliente.

De la determinación cualitativa de velocidad de aire se hizo con un anemómetro de paletas en la línea; de los tres niveles probados se seleccionó el nivel medio (10 m/s) por reunir los requisitos apropiados para la experimentación. Aunque a velocidades mayores se obtenían mejores resultados en cuanto a precisión.

La velocidad media está registrada en el cuadro de resultados 1.

Cuadro 1: Velocidad media con anemómetro de paletas.

Repetición #	ft/30seg	ft/s	m/s
1	1032	34.400	10.488
2	971	32.367	9.868
3	1100	36.667	11.179
4	1073	35.767	10.904
5	1076	35.867	10.935

Promedio	1050.400	35.013	10.675
Desv. Std	45.319		
C.V.	4.31%		

La instalación carecía de filtros y trampas de humedad y aceite propios para dar un flujo limpio, lo que dificultaba la operatividad del hilo caliente por largos periodos de tiempo (30). Durante la toma de datos de la serie experimental #7 el hilo de tungsteno de 5 μm se rompió debido al uso continuo, la figura 7 muestra el comportamiento de este evento, donde se puede observar una discontinuidad de los puntos. Nótese que en la primera sección de la curva, los primeros 11mm del diámetro, los valores son muy similares a los de la serie 6, aunque en esta gráfica no es apreciable, debido a la escala, sí lo es en las tablas de resultados. En la posición correspondiente a los 12 milímetros del diámetro interno, el sistema automático registró y promedió medidas de voltaje estando el hilo entero y después de romperse. La línea recta constante en los 0.3 volts es la medida que registra el aparato al trabajar con el circuito abierto o con la falta del hilo caliente.

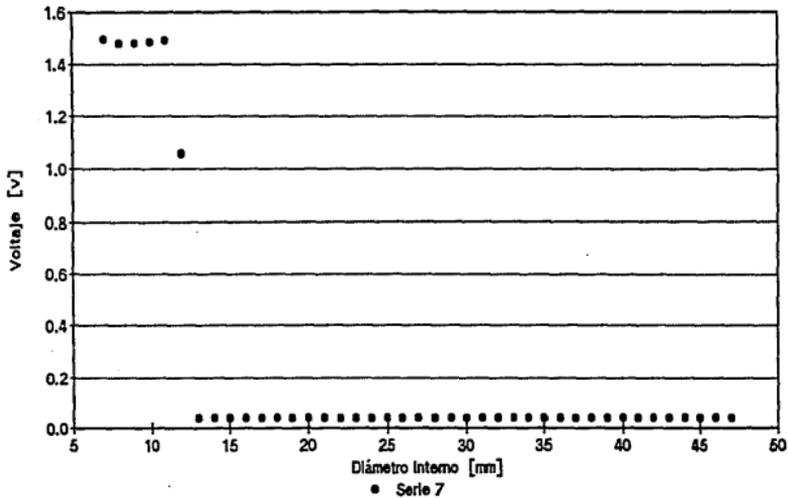
La placa de orificio resultó ser una medida de control confiable dado que, durante la experimentación, las lecturas tomadas de ella se mantuvieron sin variaciones durante las mediciones con el tubo Pitot, como se comprueba en el cuadro 2, donde pueden apreciarse una desviación estandar y un coeficiente de variación de 0%, que en resultados experimentales es lo ideal.

Cuadro 2: Placa de orificio.

# Repetición	Lectura	Media	Desviación Std.	Coefficiente de variación
	mmH2O	mmH2O		%
1	101	101	0.0	0.0
2	101			
3	101			
4	101			

La obtención de voltajes puntuales a lo largo del diámetro del tubo se realizó con el sistema automatizado de

Figura 7: Serie 7
Voltaje vs posición



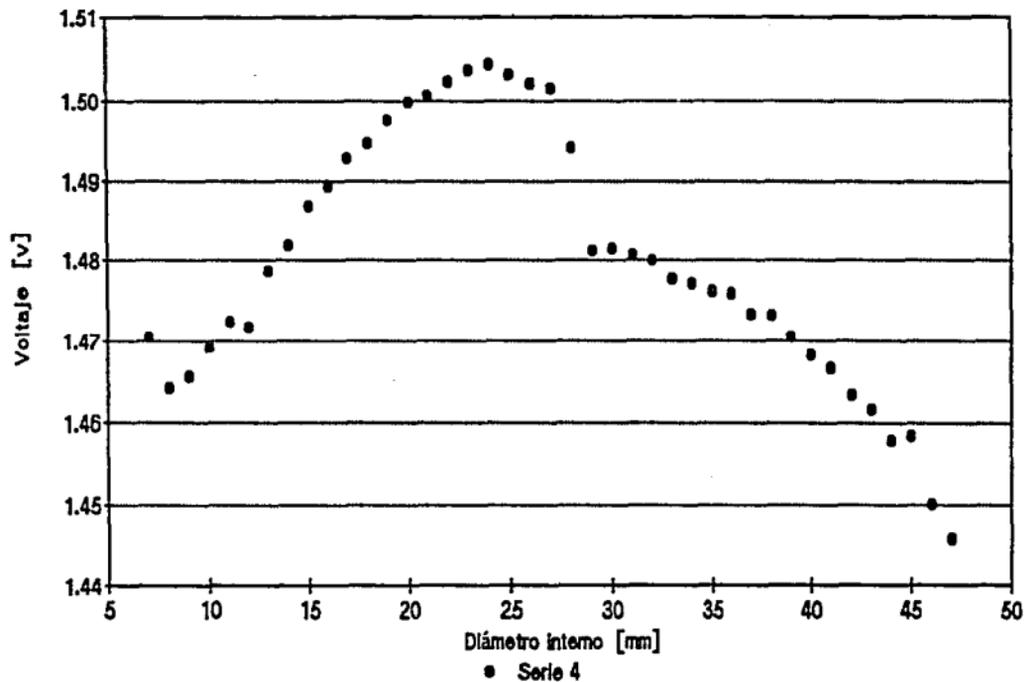
posicionamiento de la sonda, lo que permitió ubicarla en 41 posiciones.

La figura 8 muestra el comportamiento de la 4ª serie experimental, hecha con el anemómetro de hiló caliente en las 41 posiciones del diámetro interno. Nótese como la primera mitad de la curva es de nuevo similar a las otras series experimentales, hasta el punto correspondiente al milímetro 27 del diámetro interno, donde se tuvo una variación de 1 mmH₂O en el manómetro U de la placa de orificio, apreciable en la segunda mitad de la curva, dando como resultado una variación de 0.02 volts en la lectura del anemómetro, que aunque con respecto al promedio esta variación es de solo 1.8%, la figura 8 de esta serie muestra que esta diferencia no puede despreciarse. Se tomó en cuenta también que para la serie promedio la variación porcentual, o error, más grande es de 0.9%, cuadro de resultados 3. Esta serie o repetición, al igual que la serie 7 no se toman en cuenta para análisis posteriores o para el cálculo de la serie promedio.

Los datos de voltaje graficados contra la posición resultan en perfiles parabólicos, figura 9, aunque la prueba de normalidad indica que estas curvas no siguen ese comportamiento, debido a que en la pared del tubo opuesta a la entrada de la sonda recta del anemómetro está la entrada de las sondas curvas, angulares y del tubo Pitot, ilustrado en la figura 6, lo que crea una depresión en el continuo de la línea, donde el fluido presenta anomalías en su flujo que una pared lisa no le causaría. Este punto, siempre el primero de la serie, es de velocidad mucho mayor al que debería aparecer junto a una pared debido a que no existe la fricción del aire con esta. Los puntos de "alta velocidad" cercanos a esta pared son muy claros en las gráficas 7, 8, y 9, que se encuentran ubicados entre los 5 y los 12 mm del diámetro interno y con voltajes entre 1.46 y 1.50, con variaciones entre las series.

Esta característica es ajena a la técnica y muy particular del sistema donde se trabajó experimentalmente la validación.

Figura 8: Serie 4
Voltaje vs Posición

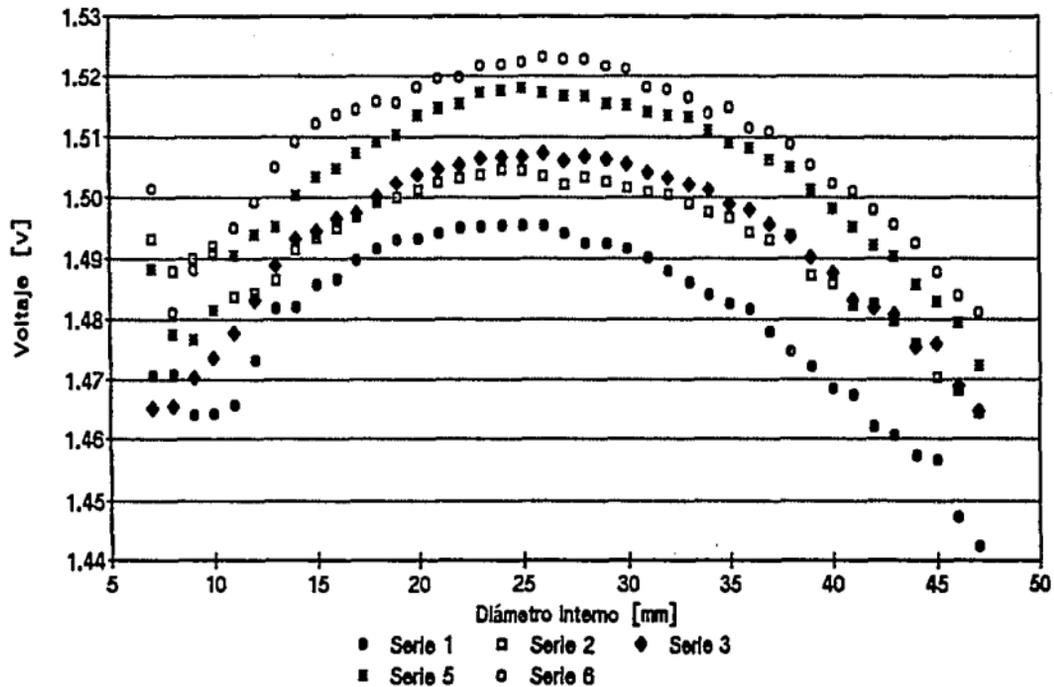


Cuadro 3: Todas las series

Aneandentro de hilo caliente

Posición an día.	Posición Rel.	Serie 1 Volts	Serie 2 Volts	Serie 3 Volts	Serie 5 Volts	Serie 6 Volts	procedio Volts	Desv Std.	C.V. %	X	Posición an día.	Posición Rel.	Tubo Pitot			Velocidad m/s	
													Serie 4 Volts	Serie 7 Volts	Procedio m/s		Presión Ma
7	1	1.478742	1.493196	1.465192	1.468312	1.501589	1.4837982	0.0137042	0.9235916		7	1	1.478562	1.501116	57.667	75,229.1325	7.3282
8	2	1.478021	1.487972	1.465684	1.477624	1.481837	1.4768012	0.0097787	0.5273957		8	2	1.464127	1.483117			
9	3	1.464854	1.489381	1.478291	1.476723	1.488089	1.4776856	0.0097918	0.6754454		9	3	1.465554	1.485646	61.888	75,261.7529	8.9554
10	4	1.464192	1.491938	1.473665	1.481658	1.498921	1.4804668	0.0185319	0.7113838		10	4	1.463126	1.498745			
11	5	1.465761	1.483743	1.477841	1.498589	1.495888	1.4825824	0.0124955	0.691326		11	5	1.472683	1.495411	65.888	75,308.8973	10.6888
12	6	1.473271	1.484196	1.483155	1.493982	1.499254	1.4867556	0.0098483	0.6888527		12	6	1.471846	1.485834			
13	7	1.481681	1.486631	1.488882	1.495313	1.505136	1.491529	0.0088776	0.541568		13	7	1.478802	0.839898	66.333	75,313.9455	11.1017
14	8	1.481981	1.491373	1.493275	1.508371	1.58941	1.495292	0.0091839	0.6149194		14	8	1.481983	0.833215			
15	9	1.485766	1.493335	1.494451	1.503567	1.512273	1.4978784	0.0091586	0.6189819		15	9	1.487802	0.839176	67.667	75,326.9936	11.5743
16	10	1.485668	1.495879	1.496471	1.503837	1.513784	1.4993918	0.0092275	0.6154162		16	10	1.483393	0.839878			
17	11	1.488895	1.495682	1.49751	1.507587	1.514549	1.5012466	0.0097286	0.58889		17	11	1.492279	0.839176	69.888	75,348.8418	12.8284
18	12	1.491511	1.493352	1.502874	1.509429	1.516842	1.5032816	0.0084686	0.563343		18	12	1.494272	0.839117			
19	13	1.492281	1.500078	1.502445	1.518547	1.515548	1.5042288	0.0097361	0.5273533		19	13	1.497544	0.839819	71.888	75,359.6148	12.6798
20	14	1.493139	1.501214	1.503939	1.513665	1.518197	1.5068288	0.0094561	0.5395513		20	14	1.499828	0.839			
21	15	1.494197	1.502568	1.504821	1.514646	1.519629	1.5071722	0.0091223	0.5975641		21	15	1.508678	0.839878	72.333	75,372.6622	13.8948
22	16	1.495138	1.503253	1.505585	1.515411	1.519985	1.5078394	0.0088885	0.5841881		22	16	1.502438	0.839589			
23	17	1.495216	1.503839	1.506695	1.517313	1.521485	1.5089756	0.0095483	0.6327682		23	17	1.503718	0.839841	72.667	75,375.9242	13.1967
24	18	1.495491	1.504881	1.506741	1.517688	1.521932	1.5093248	0.0094589	0.6266991		24	18	1.504223	0.839117			
25	19	1.495334	1.504685	1.506762	1.51682	1.521274	1.5094288	0.0097266	0.6443823		25	19	1.508224	0.839196	73.667	75,385.7183	13.4978
26	20	1.495335	1.503784	1.507448	1.517274	1.522528	1.5068288	0.0094561	0.5395513		26	20	1.502165	0.839196			
27	21	1.494414	1.502271	1.505233	1.516765	1.522944	1.5084786	0.012673	0.6884412		27	21	1.505191	0.839127	73.667	75,385.7183	13.4978
28	22	1.492453	1.502566	1.506938	1.516744	1.522865	1.5085172	0.019568	0.6885527		28	22	1.494416	0.839898			
29	23	1.492238	1.502625	1.506389	1.515371	1.521277	1.5076764	0.0122221	0.6788821		29	23	1.481212	0.839196	73.667	75,385.7183	13.4978
30	24	1.491688	1.501686	1.505783	1.515215	1.521336	1.5071836	0.013982	0.6894125		30	24	1.481488	0.839898			
31	25	1.49412	1.508861	1.504214	1.514195	1.518196	1.5055172	0.029965	0.6619884		31	25	1.488781	0.839157	72.667	75,375.9242	13.1967
32	26	1.487854	1.508628	1.503351	1.513568	1.517765	1.5046252	0.0184992	0.6977587		32	26	1.479342	0.839157			
33	27	1.486158	1.499839	1.502156	1.513324	1.516491	1.5044274	0.0188387	0.7282541		33	27	1.477732	0.839176	71.667	75,366.1381	12.8886
34	28	1.494878	1.497548	1.501252	1.511195	1.513341	1.5016828	0.0186576	0.7897498		34	28	1.477195	0.839215			
35	29	1.482569	1.495666	1.49836	1.503234	1.514843	1.5084544	0.0111488	0.7424944		35	29	1.476161	0.839	78.667	75,356.3528	12.5729
36	30	1.481686	1.494256	1.49882	1.508847	1.511567	1.4997958	0.0186832	0.7127816		36	30	1.475927	0.839117			
37	31	1.478833	1.493838	1.495647	1.506429	1.511	1.4963643	0.0115818	0.7684869		37	31	1.473552	0.839127	68.667	75,336.7797	11.9165
38	32	1.474741	1.493661	1.493549	1.505877	1.508919	1.4952294	0.0119867	0.7963146		38	32	1.473262	0.839829			
39	33	1.472134	1.487137	1.490838	1.501332	1.505828	1.4912338	0.0117415	0.787368		39	33	1.478511	0.839196	66.667	75,317.2875	11.2217
40	34	1.468426	1.485959	1.487489	1.498175	1.50239	1.4884878	0.0188866	0.7931955		40	34	1.468169	0.839117			
41	35	1.46727	1.482489	1.483175	1.495331	1.501176	1.4858882	0.011734	0.7859777		41	35	1.466625	0.839196	64.667	75,297.6353	10.4818
42	36	1.462873	1.48245	1.461782	1.492213	1.498878	1.4833192	0.0122592	0.8264716		42	36	1.463282	0.839157			
43	37	1.4648525	1.479763	1.488882	1.498373	1.495628	1.4814182	0.0128146	0.8181196		43	37	1.461578	0.839878	62.667	75,278.8631	9.6838
44	38	1.457192	1.475938	1.475389	1.485723	1.492451	1.4773386	0.0119192	0.8667989		44	38	1.45793	0.839898			
45	39	1.456593	1.478232	1.475338	1.482997	1.487666	1.4746832	0.0188321	0.7345488		45	39	1.458571	0.839127			
46	40	1.447447	1.468856	1.466884	1.479587	1.48392	1.4695554	0.0126247	0.8598849		46	40	1.458283	0.839127	59.333	75,245.4427	8.1843
47	41	1.44223	1.464467	1.464683	1.472271	1.481154	1.464965	0.01287	0.8785188		47	41	1.45785	0.839157	56.333	75,216.8893	6.5474

Figura 9: Todas las series
Voltaje vs Posición



Se puede afirmar que en este caso, el del anemómetro de hilo caliente que opera en el C.I.M., los perfiles no son simétricos por lo que no es válido obtener datos en el radio de la tubería y suponerlos iguales para el radio opuesto, a menos que opere en una línea diferente en condiciones similares, donde la calibración aún es válida [7].

Se observó además que las curvas en la figura 9 mostraban una tendencia al desfase en el voltaje, con diferencias cercanas al 0.2% entre cada curva o serie, aproximadamente.

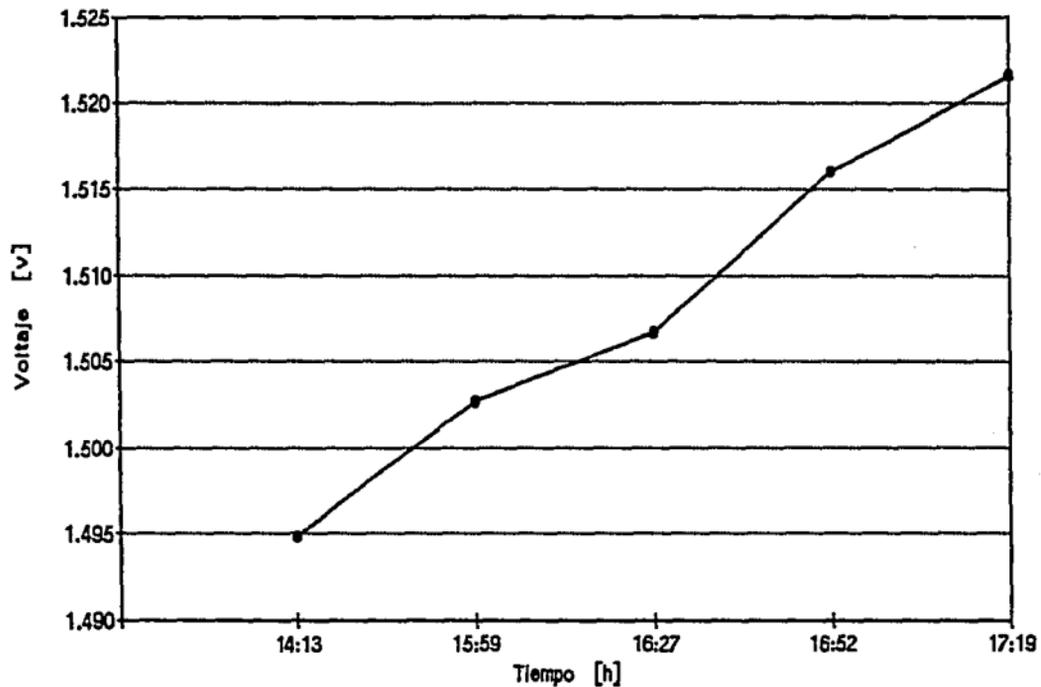
Sabiendo que estas diferencias no podían haber sido causadas por diferencias en el flujo, ya que las mediciones con la placa de orificio fueron constantes, y se observó que el desfase estaba en función a las series evaluadas a distintos tiempos.

Para analizar entonces este fenómeno se reprodujo cada uno de los vértices de las parábolas que formaban estas 5 series experimentales (1, 2, 3, 5 y 6), para así obtener el valor máximo de cada una, y este valor se graficó contra el tiempo, que había sido registrado en los archivos de la computadora, figura 10.

Este comportamiento se entiende como la deriva térmica del aparato electrónico, debida al calentamiento durante el tiempo prolongado de funcionamiento. Se recomienda: a) reportarse como error experimental o bien, b) Pueden hacerse correcciones a esta deriva térmica.

1) La pendiente de la curva linearizada de la figura 10 puede reportarse como un porcentaje de error debido a esta deriva térmica y/o considerarse despreciable si el equipo trabaja por periodos cortos de tiempo (menores a 3 horas).

Figura 10: Deriva térmica
Voltaje vs tiempo



ii) En caso del uso continuo del equipo por tiempos prolongados, (esto es mayores a 4 horas), deberán hacerse correcciones a los datos con las constantes obtenida de la curva, que está representada en la figura 11 y cuya ecuación de recta de corrección en promedio es:

$$y = b + mx$$

donde:

y= volts

b=1.374 volts

m=0.0083 volts/hora

x= Tiempo en horas

o expresado de otra forma:

Volts de error = $1.374 + 0.0083(\text{tiempo de funcionamiento})$

Ecc. 33

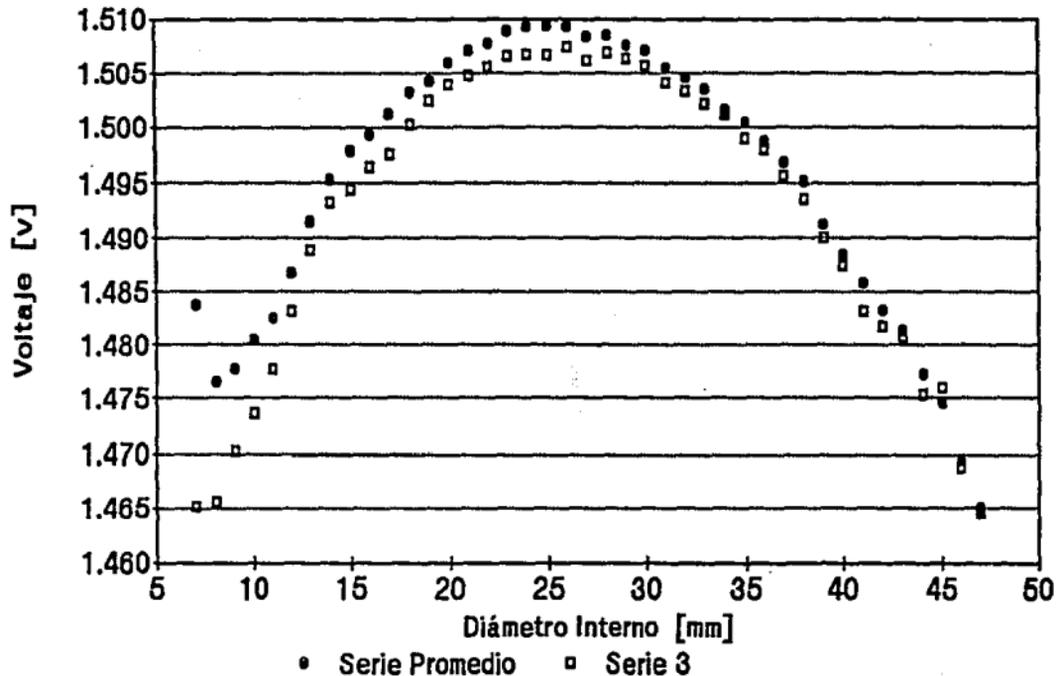
Esto es, también, después de 3 horas de funcionamiento constante, comparado con un valor bajo de 1.464965 volts, el error es de 1.76%

La figura 11 muestra la curva de la serie promedio, que abarca las series 1, 2, 3, 5 y 6, comparando este promedio con la serie 3, que es representativa (ver conclusiones de repetibilidad). En esta curva puede apreciarse la tendencia general de las series a mostrar un punto de alta velocidad en la pared opuesta a la entrada de la sonda. La diferencia de este primer punto de la serie promedio con la serie representativa es de 1.25%

b) Determinación de perfiles de velocidad con tubo Pitot.

Las mediciones de presión estática se hicieron constantemente durante la obtención de presiones dinámicas con

Figura 11: Serie promedio
Voltaje vs Posición



tubo Pitot, y dado que el flujo se mantuvo constante en presión, velocidad y temperatura, esta no varió de manera significativa durante la fase experimental, como puede apreciarse en el coeficiente de variación de las mediciones de esta etapa, mostrado en el cuadro de resultados 4.

Cuadro 4: Presión estática.

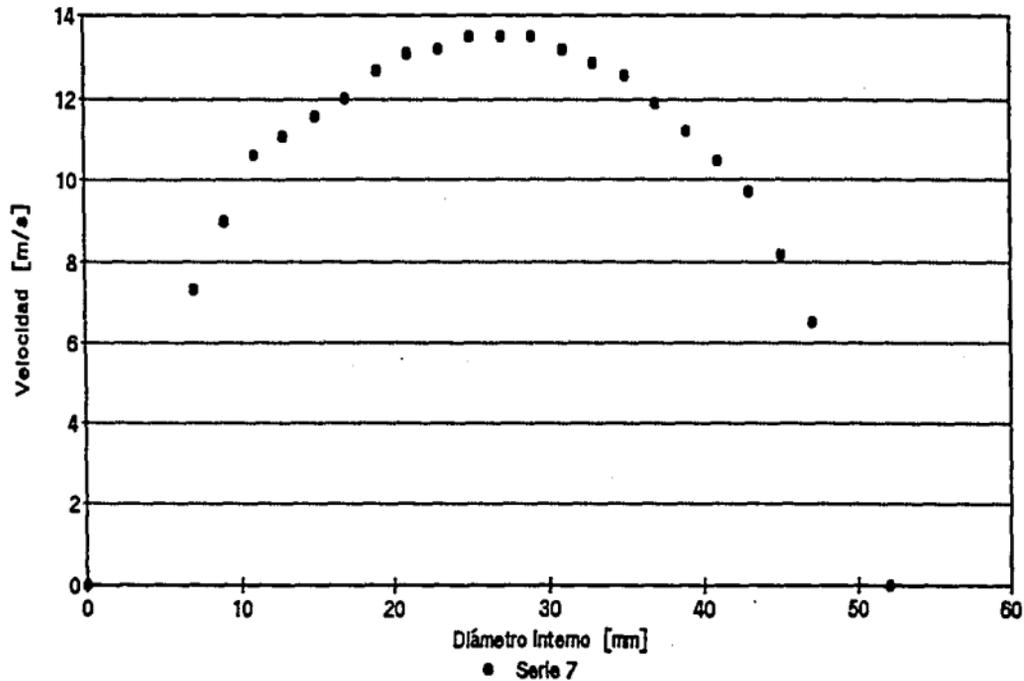
# Repetición	Lectura	Media	Desviación Std.	Coefficiente de Variación %
	mmH2O	mmH2O		
1	51	51.25	0.43	0.85
2	51			
3	52			
4	51			

Sobre la operación del tubo Pitot, dado que no fué automatizada, debió hacerse con extremo cuidado. Los errores en la orientación y en el posicionamiento de la sonda durante la experimentación eran patentes de manera inmediata durante las mediciones. Debido también a esta operación manual no era posible medir en los mismos 41 puntos del diámetro en los que se midió con el anemómetro de hilo caliente y mantener precisión confiable en las mediciones, por lo mismo solo se hicieron 4 repeticiones en esta serie y en solo 21 puntos del diámetro.

La conversión de presión puntual a velocidad puntual para los datos obtenidos del tubo Pitot se hicieron en base a la ecuación 7. La curva que representa el comportamiento de la velocidad en función del diámetro interno se encuentra en la figura 12.

En las pruebas de Ji cuadrada para tubo Pitot se contrastó el 14.13 calculado contra un valor de tablas, con significancia de 99.95%, de 20, lo que significa que los perfiles obtenidos con tubo Pitot si se ajustaron a una distribución normal, como era de esperar.

Figura 12: Tubo Pitot
Velocidad de aire vs posición



Se puede afirmar que en este caso, el del tubo Pitot utilizado en esta experimentación, los perfiles de velocidad obtenidos en función del diámetro sí son simétricos, por lo que es válido obtener datos en el radio de la tubería y suponerlos iguales para el radio opuesto; a diferencia del anemómetro de hilo caliente ya que los puntos de alta velocidad más cercanos a la pared no son registrados por el tubo Pitot, debido esto a su forma angular, que le permite hacer la medición del flujo antes de las depresiones en la pared de la tubería, por lo que sí registra un flujo continuo y simétrico a lo largo de todo el perfil, figura 12.

c) Validación de la técnica de anemometría de hilo caliente en aire.

De los análisis realizados los siguientes son resultados de la validación.

1) Repetibilidad: Con esta prueba se comprobó que la técnica de anemometría de hilo caliente es repetible, ya que se realizó un análisis de bloques aleatorios completo, para determinar la dispersión de los resultados.

La repetibilidad puede expresarse cuantitativamente como una característica de la dispersión de los resultados, dado que éste es un método analítico expresado como la coincidencia obtenida entre determinaciones independientes, realizadas por un mismo analista, usando los mismos aparatos y técnicas.

Esta expresión cuantitativa es el reporte de los resultados de el análisis de bloques aleatorios completo, donde se obtuvo una F calculada de 0.46 que se contrastó con una F de tablas de 1.59, cuadro de resultados 5.

El resultado final es la seguridad para el analista de que cada serie experimental que realice con la técnica será repetible, esto es, será de propiedades iguales a las otras

Centro 5: Repetibilidad

Posición	serie 1	serie 2	serie 3	serie 5	serie 6
1	1.437872	1.492126	1.463372	1.473312	1.501889
2	1.472822	1.48722	1.463824	1.47722	1.482878
3	1.464672	1.49981	1.47422	1.47522	1.488823
4	1.464122	1.491978	1.472625	1.471528	1.498923
5	1.465472	1.482743	1.477841	1.475729	1.495828
6	1.472271	1.468956	1.480225	1.485282	1.499258
7	1.481224	1.48622	1.488282	1.473222	1.502126
8	1.480152	1.491323	1.492275	1.492221	1.50481
9	1.483726	1.492225	1.494451	1.492257	1.512223
10	1.486258	1.494279	1.496471	1.492837	1.513784
11	1.485285	1.495862	1.497551	1.497287	1.514541
12	1.491221	1.495222	1.500274	1.497429	1.515242
13	1.491221	1.500878	1.501245	1.501547	1.515548
14	1.491223	1.501214	1.503223	1.502255	1.516187
15	1.491127	1.502258	1.504281	1.504466	1.516523
16	1.492123	1.503223	1.505285	1.505241	1.516925
17	1.492225	1.503979	1.506243	1.507221	1.517815
18	1.492489	1.504881	1.507241	1.507283	1.518253
19	1.492524	1.506465	1.508262	1.509282	1.518784
20	1.492525	1.507384	1.509448	1.509274	1.519228
21	1.492489	1.508271	1.508223	1.510265	1.519724
22	1.492425	1.508286	1.508929	1.510544	1.520265
23	1.492425	1.509223	1.510223	1.511221	1.520727
24	1.492425	1.510223	1.511223	1.512225	1.521224
25	1.492425	1.511223	1.512223	1.513225	1.521726
26	1.492425	1.512223	1.513223	1.514225	1.522228
27	1.492425	1.513223	1.514223	1.515225	1.522730
28	1.492425	1.514223	1.515223	1.516225	1.523232
29	1.492425	1.515223	1.516223	1.517225	1.523734
30	1.492425	1.516223	1.517223	1.518225	1.524236
31	1.492425	1.517223	1.518223	1.519225	1.524738
32	1.492425	1.518223	1.519223	1.520225	1.525240
33	1.492425	1.519223	1.520223	1.521225	1.525742
34	1.492425	1.520223	1.521223	1.522225	1.526244
35	1.492425	1.521223	1.522223	1.523225	1.526746
36	1.492425	1.522223	1.523223	1.524225	1.527248
37	1.492425	1.523223	1.524223	1.525225	1.527750
38	1.492425	1.524223	1.525223	1.526225	1.528252
39	1.492425	1.525223	1.526223	1.527225	1.528754
40	1.492425	1.526223	1.527223	1.528225	1.529256
41	1.492425	1.527223	1.528223	1.529225	1.529758

serie 1	serie 2	serie 3	serie 5	serie 6	
1	1.48951	1.504926	1.48722	1.49222	1.50722
2	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
3	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
4	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
5	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
6	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
7	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
8	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
9	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
10	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
11	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
12	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
13	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
14	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
15	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
16	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
17	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
18	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
19	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
20	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
21	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
22	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
23	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
24	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
25	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
26	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
27	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
28	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
29	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
30	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
31	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
32	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
33	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
34	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
35	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
36	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
37	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
38	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
39	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
40	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722
41	1.49222	1.50722	1.49222	1.49222	1.50722

Posición	serie 1	serie 2	serie 3	serie 5	serie 6
1	1.462822	1.477826	1.472822	1.475826	1.480822
2	1.463224	1.478228	1.473224	1.476228	1.481224
3	1.463626	1.478632	1.473626	1.476632	1.481626
4	1.464028	1.479036	1.474028	1.477036	1.482028
5	1.464430	1.479440	1.474430	1.477440	1.482430
6	1.464832	1.479844	1.474832	1.477844	1.482832
7	1.465234	1.480248	1.475234	1.478248	1.483234
8	1.465636	1.480652	1.475636	1.478652	1.483636
9	1.466038	1.481056	1.476038	1.479056	1.484038
10	1.466440	1.481460	1.476440	1.479460	1.484440
11	1.466842	1.481864	1.476842	1.479864	1.484842
12	1.467244	1.482268	1.477244	1.480268	1.485244
13	1.467646	1.482672	1.477646	1.480672	1.485646
14	1.468048	1.483076	1.478048	1.481076	1.486048
15	1.468450	1.483480	1.478450	1.481480	1.486450
16	1.468852	1.483884	1.478852	1.481884	1.486852
17	1.469254	1.484288	1.479254	1.482288	1.487254
18	1.469656	1.484692	1.479656	1.482692	1.487656
19	1.470058	1.485096	1.480058	1.483096	1.488058
20	1.470460	1.485500	1.480460	1.483500	1.488460
21	1.470862	1.485904	1.480862	1.483904	1.488862
22	1.471264	1.486308	1.481264	1.484308	1.489264
23	1.471666	1.486712	1.481666	1.484712	1.489666
24	1.472068	1.487116	1.482068	1.485116	1.490068
25	1.472470	1.487520	1.482470	1.485520	1.490470
26	1.472872	1.487924	1.482872	1.485924	1.490872
27	1.473274	1.488328	1.483274	1.486328	1.491274
28	1.473676	1.488732	1.483676	1.486732	1.491676
29	1.474078	1.489136	1.484078	1.487136	1.492078
30	1.474480	1.489540	1.484480	1.487540	1.492480
31	1.474882	1.489944	1.484882	1.487944	1.492882
32	1.475284	1.490348	1.485284	1.488348	1.493284
33	1.475686	1.490752	1.485686	1.488752	1.493686
34	1.476088	1.491156	1.486088	1.489156	1.494088
35	1.476490	1.491560	1.486490	1.489560	1.494490
36	1.476892	1.491964	1.486892	1.489964	1.494892
37	1.477294	1.492368	1.487294	1.490368	1.495294
38	1.477696	1.492772	1.487696	1.490772	1.495696
39	1.478098	1.493176	1.488098	1.491176	1.496098
40	1.478500	1.493580	1.488500	1.491580	1.496500
41	1.478902	1.493984	1.488902	1.491984	1.496902

Posición	serie 1	serie 2	serie 3	serie 5	serie 6
1	1.489186	1.504190	1.487186	1.492190	1.507194
2	1.492190	1.507194	1.490190	1.495194	1.510198
3	1.495194	1.510198	1.493194	1.498198	1.513202
4	1.498198	1.513202	1.496198	1.501202	1.516206
5	1.501202	1.516206	1.499202	1.504206	1.519210
6	1.504206	1.519210	1.502206	1.507210	1.522214
7	1.507210	1.522214	1.505210	1.510214	1.525218
8	1.510214	1.525218	1.508214	1.513218	1.528222
9	1.513218	1.528222	1.511218	1.516222	1.531226
10	1.516222	1.531226	1.514222	1.519226	1.534230
11	1.519226	1.534230	1.517226	1.522230	1.537234
12	1.522230	1.537234	1.520230	1.525234	1.540238
13	1.525234	1.540238	1.523234	1.528238	1.543242
14	1.528238	1.543242	1.526238	1.531242	1.546246
15	1.531242	1.546246	1.529242	1.534246	1.549250
16	1.534246	1.549250	1.532246	1.537250	1.552254
17	1.537250	1.552254	1.535250	1.540254	1.555258
18	1.540254	1.555258	1.538254	1.543258	1.558262
19	1.543258	1.558262	1.541258	1.546262	1.561266
20	1.546262	1.561266	1.544262	1.549266	1.564270
21	1.549266	1.564270	1.547266	1.552270	1.567274
22	1.552270	1.567274	1.550270	1.555274	1.570278
23	1.555274	1.570278	1.553274	1.558278	1.573282
24	1.558278	1.573282	1.556278	1.561282	1.576286
25	1.561282	1.576286	1.559282	1.564286	1.579290
26	1.564286	1.579290	1.562286	1.567290	1.582294
27	1.567290	1.582294	1.565290	1.570294	1.585298
28	1.570294	1.585298	1.568294	1.573298	1.588302
29	1.573298	1.588302	1.571298	1.576302	1.591306
30	1.576302	1.591306	1.574302	1.579306	1.594310
31	1.579306	1.594310	1.577306	1.582310	1.597314
32	1.582310	1.597314	1.580310	1.585314	1.600318
33	1.585314	1.600318	1.583314	1.588318	1.603322
34	1.588318	1.603322	1.586318	1.591322	1.606326
35	1.591322	1.606326	1.589322	1.5	

series, salvo por los errores experimentales. Es así como se puede tomar cualquier serie experimental como serie representativa.

La figura 11 muestra la serie experimental 3, comparada con el promedio de las 5 series experimentales. El desfase que existe entre estas curvas en el centro es debido al promedio de los errores experimentales.

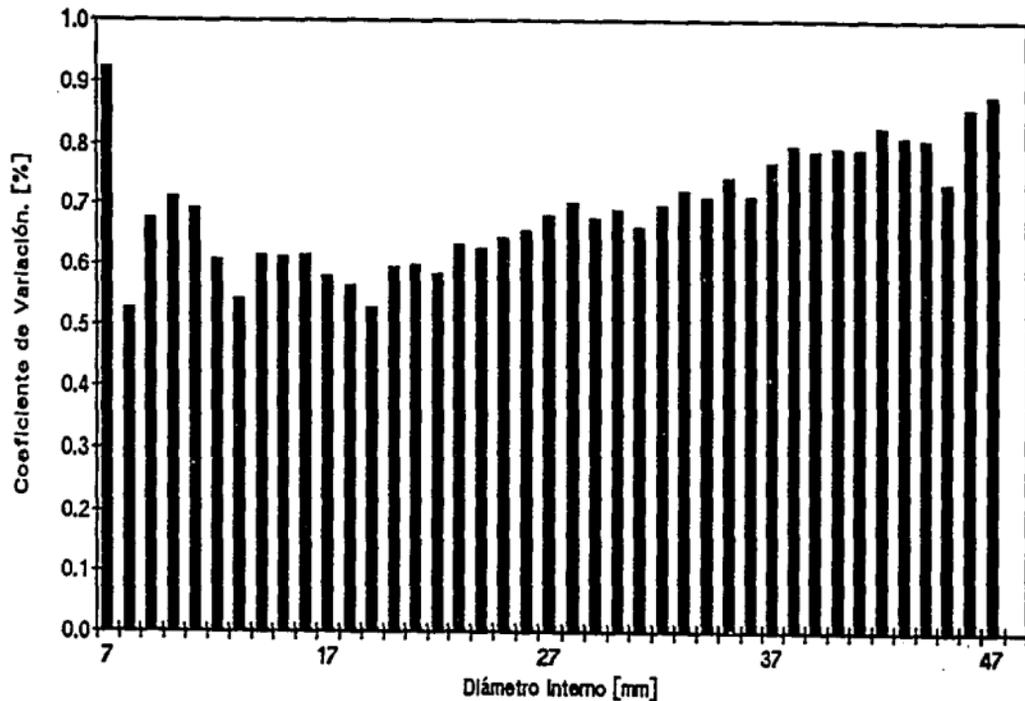
ii) Precisión: Esta se evaluó analizando los coeficientes de variación de la velocidad según la posición en el diámetro de la línea.

En la figura 13 se pudo observar que los valores de coeficientes de variación aumentaban cerca de las paredes de la tubería y que el valor mayor corresponde precisamente a la posición donde se detectaron las zonas de alta velocidad, aún tratándose de una zona cercana a la pared de la línea, debido a los motivos previamente mencionados.

Los coeficientes de variación presentaron un valor mayor de 0.92% a los 8 mm del diámetro interno y un valor menor de 0.53% a los 9mm, siendo el promedio de la variación de todos los datos 0.70%, ver cuadro 6.

Este coeficiente de variación significa que, con el anemómetro de hilo caliente, se puede tener la seguridad de que la variaciones en las mediciones no serán mayores al 0.7% del valor medido, lo que lo hace un aparato de "alta precisión".

Figura 13: Coeficiente de Variación
Precisión en % vs Posición



Cuadro 6: Variación porcentual por posición.

Posición mm diam.	C.V. %		Posición mm diam.	C.V. %	
7	0.92	Val Mayor	27	0.68	
8	0.53	Val Menor	28	0.70	
9	0.68		29	0.68	
10	0.71		30	0.69	
11	0.69		31	0.66	
12	0.61		32	0.70	Val. Prom.
13	0.54		33	0.72	
14	0.61		34	0.71	
15	0.61		35	0.74	
16	0.62		36	0.71	
17	0.58		37	0.77	
18	0.56		38	0.80	
19	0.53		39	0.79	
20	0.59		40	0.79	
21	0.60		41	0.79	
22	0.58		42	0.83	
23	0.63		43	0.81	
24	0.63		44	0.81	
25	0.64		45	0.73	
26	0.65		46	0.86	
			47	0.88	

iii) Reproducibilidad: Esta se evaluó reproduciendo las series experimentales en base a las ecuaciones, elaboradas éstas en base a los datos experimentales. Estos nuevos puntos se analizaron con un análisis de coeficiente de variación.

Las ecuaciones de las series son:

Serie 1:

$$y = 1.4529 + 4.859e-4x + 2.154e-4x^2 - 8.71e-6x^3 \quad \text{Ecc. 34}$$
$$r = 0.97$$

Serie 2:

$$y = 1.4805 + 5017e-4x + 5.302e-5x^2 - 1.528e6x^3 \quad \text{Ecc. 35}$$
$$r = 0.97$$

Serie 3:

$$y = 1.4291 + 0.0058x - 1.084e-4x^2 \quad \text{Ecc. 36}$$
$$r = 0.99$$

Serie 5:

$$y = 1.4416 + 0.0056x - 1.053-4x^2 \quad \text{Ecc. 37}$$
$$r = 0.98$$

Serie 6:

$$y = 1.4547 + 0.0051x - 9.722e-5x^2 \quad \text{Ecc. 38}$$
$$r = 0.97$$

Serie promedio:

$$y = 1.4435 + 0.005x - 9.70e-5x^2 \quad \text{Ecc. 39}$$
$$r = 0.99$$

10 puntos de las series reproducidas y los coeficientes de variación de estas series aparecen en el cuadro 7, en éste se muestran además los coeficientes de variación de las series experimentales en los mismos puntos. Las diferencias que existen entre estos es depreciable, por lo que se dice que la prueba es reproducible.

iv) Linearidad: La figura 14 es el resultado de la comparación de los datos obtenidos del anemómetro de hilo caliente con los datos del tubo Pitot. Estos mismos valores se utilizaron para construir el diagrama de dispersión, figura 15.

Los valores de la ecuación de la línea recta obtenida de la linearización del diagrama de dispersión, son según la siguiente ecuación:

$$y = 0.005902(x) + 1.427717 \quad \text{Ecc. 40}$$

con un coeficiente de correlación (r) de 0.909. Lo que traducido a voltajes y velocidades es, como variable independiente "x": la velocidad de aire, como variable dependiente "y": el voltaje, y donde "b" y "m" son constantes que resumen todas las variables que debieron de mantenerse constantes durante la experimentación, tales como resistencias, capacidades caloríficas, densidades, viscosidad, etc. Sea entonces la ecuación 40 comparada con las ecuaciones 28 y 32 para obtener la ecuación 41:

$$RI^2 = A + BU^n \quad \text{Ecc. 28 (23), (27)}$$

$$V = kU + A \quad \text{Ecc. 32 (23)}$$

$$V = 0.005902 \cdot U + 1.427717 \quad \text{Ecc. 41}$$

donde:

V= Voltaje [volts]

U= Velocidad [m/s]

k, A y B= Constantes.

Cuadro 7

Series reproducidas

Posición mm diám in	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 5	Serie 6	Serie promedio reproducid
10	1.47113	1.48931	1.47626	1.48707	1.49598	1.48380
14	1.48078	1.49376	1.48905	1.49936	1.50704	1.49449
18	1.48873	1.49786	1.49838	1.50828	1.51500	1.50207
22	1.49364	1.50102	1.50423	1.51383	1.51985	1.50655
26	1.49470	1.50265	1.50662	1.51602	1.52158	1.50793
30	1.49155	1.50218	1.50554	1.51483	1.52020	1.50620
34	1.48438	1.49900	1.50099	1.51027	1.51571	1.50137
38	1.47385	1.49254	1.49297	1.50235	1.50811	1.49343
42	1.46114	1.48221	1.48148	1.49105	1.49740	1.48239
46	1.44793	1.46742	1.46653	1.47639	1.48358	1.46825

De las series
reproducidas

promedio	Desv Std.	C.V. %
1.48395	0.0090	0.61%
1.49400	0.0089	0.60%
1.50165	0.0091	0.61%
1.50652	0.0093	0.62%
1.50831	0.0095	0.63%
1.50686	0.0100	0.66%
1.50207	0.0107	0.72%
1.49396	0.0116	0.78%
1.48266	0.0123	0.83%
1.46837	0.0120	0.82%

Valor proms: 0.69%

De las series
experimentales

promedio	Desv Std.	C.V. %
1.48047	0.01053	0.71
1.49528	0.00918	0.61
1.50328	0.00847	0.56
1.50704	0.00881	0.58
1.50940	0.00988	0.65
1.50711	0.01039	0.69
1.50160	0.01066	0.71
1.49523	0.01191	0.80
1.48332	0.01226	0.83
1.46955	0.01262	0.86

Valor proms: 0.78

Figura 14: Tubo Pitot y A.H.C.

Voltaje y velocidad de aire vs diámetro

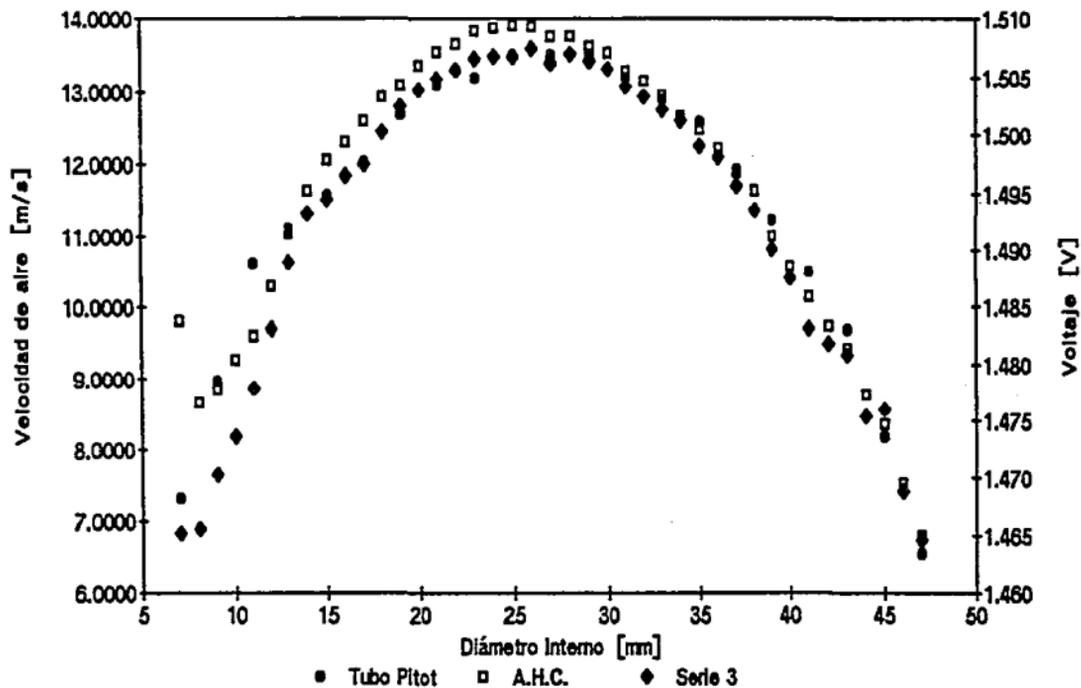
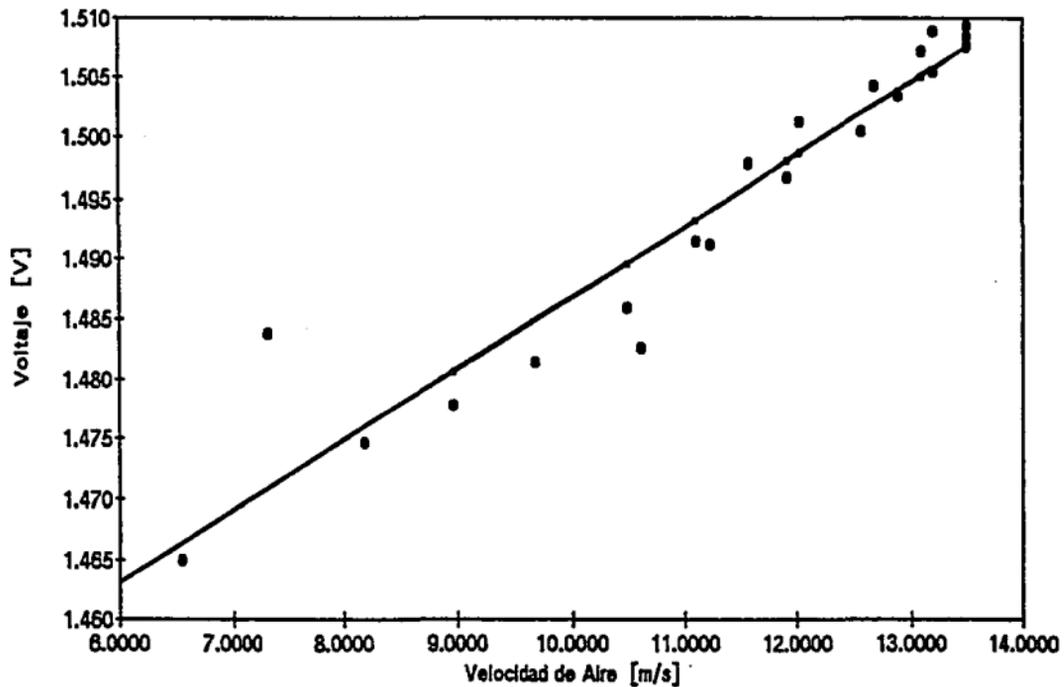


Figura 15: Relación de velocidad y vol
Voltaje vs Velocidad de aire



Esta es la expresión cuantitativa que relaciona los parámetros de velocidad de aire en metros sobre segundo y voltaje, para el anemómetro de hilo caliente que opera en el C.I.M.

v) Normalidad: Como se mencionó antes, los datos de voltaje graficados contra la posición resultan en perfiles parabólicos (figura 9), aunque la prueba de Ji cuadrada, con un valor de tablas de 20 con significancia de 99.95% para todas las series, indica que los perfiles no son curvas de distribución normal, el cuadro 8 muestra un análisis a una serie representativa, con lo que se podrá apreciar que en este caso, el del anemómetro de hilo caliente que opera en el C.I.M., los perfiles no son simétricos por lo que no es válido obtener datos en el radio de la tubería y suponerlos iguales para el radio opuesto, a menos que opere en una línea diferente en condiciones similares, donde la calibración aún es válida [27].

Cuadro B: El cuadrado para serie 6

posición	serie 6	Rango	Amplitud	Intervalos de clase fi	fi	Fi(%)	I media	CI=I(media) ² *201	S ² Desviación	S	Area		Valor Estimado	f(i-wi) ² /2ei				
											Z	Area de Tablas						
1	1.50159			1.481837	1.481837	1.487878	3	1.494525	4.452161	1.288185	0.001765978768	0.000107	0.012141	-2.24	0.01255	0.01255	0.51455	12.0056
2	1.48183	0.042221	0.041822	1.493487	1.487878	1.493183	4	1.491887	5.364346		0.001102222899			-1.74	0.04033	0.07833	1.14259	6.7142
3	1.46183			1.463183	1.493182	1.499126	5	1.495118	4.482359		0.0104267558788			-1.24	0.10749	0.16656	2.72355	0.8263
4	1.45183			1.495128	1.493126	1.503169	6	1.502153	7.518762		0.01018195528013			-0.75	0.22563	0.11914	4.62474	0.8827
5	1.45183			1.505163	1.503169	1.511202	7	1.504183	6.832742		9.399999999999999			-0.25	0.48173	0.17466	7.16145	1.3754
6	1.495254			1.511202	1.511202	1.517225	8	1.510218	13.529964		0.0122162511802			0.25	0.57871	0.19742	8.89422	0.1814
7	1.50316			1.517225	1.517225	1.523248	13	1.520251	19.762169		0.0418970454912			0.75	0.77237	0.48173	16.45329	0.7266
8	1.50316			1.523248			14	61.825483			0.065876					0.59671		21.1788
9	1.512272																	
10	1.512272																	
11	1.514569																	
12	1.515842																	
13	1.515842																	
14	1.518197																	
15	1.518197																	
16	1.519960																	
17	1.521845																	
18	1.521982																	
19	1.522476																	
20	1.522528																	
21	1.522744																	
22	1.522865																	
23	1.521727																	
24	1.521236																	
25	1.519186																	
26	1.517765																	
27	1.516491																	
28	1.513541																	
29	1.510443																	
30	1.512547																	
31	1.511																	
32	1.509119																	
33	1.505578																	
34	1.507271																	
35	1.501916																	
36	1.498878																	
37	1.495678																	
38	1.492451																	
39	1.487666																	
40	1.48332																	
41	1.481954																	

Valor de tablas. Significancia de 99.953 : 28.8

III.- Conclusiones y Recomendaciones.

- La técnica del tubo Pitot, siendo de principios mas simples se desarrolló antes que la técnica anemómetro de hilo caliente y se utiliza con frecuencia, es de bajo costo, con aparatos de facil manufactura y de manejo sencillo, es una técnica repetible, lineal, reproducible, de precisión conocida, es una técnica válida en resumen y es por tanto el patrón ideal para una segunda técnica; y fué esta la que se utilizó para dar parámetro de velocidad a los datos de voltaje del anemómetro de hilo caliente. Debe tenerse en cuenta que estos dos aparatos funcionan con principios muy diferentes. El tubo Pitot funciona midiendo presiones y transformando estas, bajo el principio del balance de Bernoulli, a velocidades puntuales; mientras que el anemómetro de hilo caliente mide la energía necesaria para hacer quedar en equilibrio un elemento termorresistente con un medio que disipa su calor, relacionando esta energía con la velocidad del fluido, si la temperatura y la concentración son constantes. Con esta técnica conocida, la del tubo Pitot y las técnicas estadísticas se demostró que la técnica de anemometría de hilo caliente es: repetible, precisa, lineal y reproducible y por tanto válida.

- El anemómetro de hilo caliente, siendo un aparato técnicamente mas complicado, costoso y complejo de operar que el tubo Pitot, es sin embargo mas preciso y ofrece nuevas y variadas posibilidades de aplicación. Una técnica no sustituye a la otra, y el ingeniero deberá decidir cuando son necesarias y aplicables estas técnica para alcanzar sus objetivos, siendo consciente de sus limitaciones y alcances en base a sus principios.

- Los datos de voltaje graficados contra la posición en el diámetro interno resultan en perfiles parabólicos y dado que la prueba de normalidad indica que estas curvas no siguen ese comportamiento, se puede afirmar que en este caso, el del anemómetro de hilo caliente que opera en el C.I.M., los perfiles no son simétricos por lo que no es válido obtener datos en el radio de la tubería y suponerlos iguales para el radio opuesto, a menos que opere en una línea diferente en condiciones similares, donde la calibración aún es válida.

- En las pruebas de Ji cuadrada para tubo Pitot se demostró que los perfiles obtenidos con tubo Pitot sí se ajustaron a una distribución normal, como era de esperar.

- Sobre el desfaseamiento que se observó en las curvas en la figura 9 se entiende como la deriva térmica del aparato electrónico, debida al calentamiento de sus elementos durante el tiempo prolongado de funcionamiento. Se recomienda: a) reportarse como error experimental o bien, b) Pueden hacerse correcciones a esta deriva térmica según la ecuación 33.

$$\text{Volts de error} = 1.374 + 0.0083 * (\text{tiempo de funcionamiento})$$

Ecc. 33

- Con el anemómetro de hilo caliente, se puede tener la seguridad de que las variaciones en las mediciones no serán mayores al 0.7% del valor medido.

- Los valores de la ecuación de la línea recta que relaciona lecturas de voltaje con velocidades de aire son:

$$V = 0.005902 \cdot U + 1.427717$$

Ecc. 41

- El error reportado para la operación del tubo Pitot es de 1% aproximadamente [20] y este deberá ser considerado sobre los resultados en las constantes de la ecuación 41, en la que intervienen para dar parámetro de velocidad a los datos de volta je del anemómetro de hilo caliente.

- La aplicación de la anemometría de hilo caliente en la ingeniería de alimentos se da principalmente en la investigación, en el diseño y en la modificación de equipos y sistemas que operan en base a fenómenos de transferencia de calor o momento, donde es necesario conocer las condiciones puntuales del sistema. Algunos ejemplo pueden ser: cámaras de refrigeración y congelación, secadores, equipos de destilación e intercambiadores de calor tales como pasteurizadores, por mencionar algunos de los equipos y procesos donde es necesario determinar propiedades tales como temperatura, concentración, velocidad y las variaciones de éstas en un punto del sistema, con precisión y rapidez.

- La utilidad práctica de este trabajo era intentar establecer un precedente práctico en la metodología para la validación de un instrumento de medición de flujo de aire, pero es paradójicamente la práctica de ésta la única manera de adquirirla; resulta entonces primordial el apoyo docente y trabajos como este funcionan únicamente como fuentes técnicas de información o ejemplos de aplicación de la metodología.

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

Bibliografía

- 1 Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., "Fenómenos de Transporte", Reverte S.A., España, 1978.
- 2 Canavos George C., "Probabilidad y estadística", McGraw Hill, México D.F., 1986.
- 3 CRAME, "Flujo de Fluidos", Mc. Grav-Hill, México D.F., 1988.
- 4 Daniel W.W., "Bioestadística", Limusa, 6ª edición, México, 1985.
- 5 Geankoplis Christie J., "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, Compañía editorial continental SA de CV, 5ª Edición, México, 1991.
- 6 Giles R.V., "Mecánica de los Fluidos e Hidráulica", McGraw Hill, 2ª Edición, México D.F., 1985.
- 7 Holdwan Jack P., "Métodos experimentales para ingenieros", McGraw Hill, 2ª Edición, México D.F., 1986.
- 8 Larson Harold J., "Introducción a la teoría y probabilidad de la inferencia estadística", Limusa.
- 9 Lesieur M., "Turbulence in Fluids", Kluwer academic publishers, 2ª Edición, Holanda, 1998.
- 10 Nataix Claudio, "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas", Harper & Row Latinoamericana, 1ª Edición, México, 1982.
- 11 Ostle Bernardo, "Estadística aplicada", Editorial LIMUSA, 11ª Edición, México, 1998.
- 12 Perry, Chilton, "Manual del Ingeniero Químico", Mc. Grav-Hill, 1ª Edición, México, 1986.
- 13 Reklaitis G.V., "Balances de Materia y Energía", Mc Grav Hill, 1ª Edición, México D.F., 1998.
- 14 Reyes Castañeda Pedro, "Bioestadística aplicada", Trillas, 2ª Edición, México D.F., 1998.
- 15 Shames Irving H., "La Mecánica de los Fluidos", Mc. Grav-Hill, 1ª Edición, México, 1967.
- 16 Spiegel Murray R., "Estadística", McGraw Hill, México, 1983.
- 17 Streeter V.L., Wylie E.B., "Mecánica de los Fluidos", Mc Grav-Hill, 3ª Edición, México D.F., 1989.
- 18 Valiente A., "Transferencia de Calor", Limusa, México, 1988.
- 19 Walpolke, "Probabilidad y estadística para ingenieros", Interamericana.
- 20 Wenzel L. A., Clump C. W., Foust A. S., "Principles of unit operations", John Wiley and Sons Inc., New York, U.S.A., 1968.
- 21 Borbón Franco Jorge Z., "Calibración de máquinas de prueba", De la Metrología, NSB, México D.F., Septiembre, 1988.
- 22 Carrera R.P., Gonzalez P.M., Farrell B.M., Villafuerte M.E., Melendez R., Arjona, "Análisis del periodo de secado de velocidad constante en un secador por aspiración.", 5ª Foro interno de investigación, Cuautitlán Izcalli, México, Enero, 1991.
- 23 Chassaing P., "Notes de cours sur L'aneometre a fil chaud", école Nationale Supérieure, Toulouse, Francia, Abril, 1974
- 24 Comité de elaboración de guías of. de validación, "Requisitos mínimos de validación de métodos analíticos", Colegio Nacional de Q.F.B. México, 1988.
- 25 Fernandez Flores R., Sánchez Silva F., "Instalación para el estudio experimental de flujos bifásicos agua-aire", Boletín IIE, México, D.F., Enero/febrero, 1989.
- 26 Fernandez Flores R., Martínez Peniche Jorge R., "Por una democracia sin huesos (ni duros ni de los otros)", Educación química, 2(1), México D.F., Enero, 1991.
- 27 Fingerson Leroy M., Freyboth Peter, "Thermal aneometers", IFA 180 System instruction manual. Apéndice B E.U. Minnesota, Agosto, 1987.
- 28 Gauvin, Katta, "Basics concepts of spray dryer drying", AIChE Journal, 22(4), E.U., Julio, 1976.
- 29 Khan M.K., MacKenzie K.A., Bruun H.H., "The effects of blockage correction in hot-wire probe calibration facilities", Journal of physics engineering, 2B, Inglaterra, 1987.
- 30 Martínez-val R., Jienez J., Rebollo M., "Sensor contamination effects in hot-wire aneometry in air.", DISA information, 27, Dinamarca, Enero, 1982.
- 31 Melendez P. Rosalia, "Apuntes de las Materias: Probabilidad y Estadística y L.E.M. IV", 1993
- 32 Nally D. Joseph, "Validation Guidelines-Industry's Perspective", Pharmaceutical Engineering", U.S.A., Mayo-Junio, 1984.
- 33 Seifert S., Graichen K., "A calibration method for hot-wire probes including the low velocity range, DISA information, 27, Dinamarca, Enero, 1982.
- 34 TSI, "Hot film and hot wire aneometry. Theory and application", Technical bulletin, TBS, E.U. Minnesota.