

CALIBRACIÓN DE TUBOS PITOT TIPO S EN EL LABINTHAP

*Tolentino G., *Abugaber J., **Tufiño M., *Tolentino R.

*Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP)
IPN-SEPI-ESIME Zacatenco

Av. IPN s/n, Col. Lindavista, 07738, México, D.F.

Tel.: 57296000 ext. 54783, fax: 57296000 ext. 54754, e-mail: gte@maya.esimez.ipn.mx

**Coordinación General de Vinculación del IPN

Coordinación de Metrología, Normas y Calidad Industrial

Tel.: 57296000 ext. 51872 y 51873, fax: 57296000 ext. 51874

Resumen: En este trabajo se presenta la determinación de la zona de calibración en el ducto de descarga de un ventilador centrífugo de 15 HP para calibrar tubos de Pitot tipo S. También se presenta el método de calibración, el análisis de las curvas de calibración por multivelocidad y el cálculo de la incertidumbre para la calibración de tubos Pitot tipo S. La determinación de la zona de calibración se realizó mediante los perfiles de velocidad en el ducto de descarga del ventilador, empleando un tubo de Pitot tipo L de nariz elipsoidal. El método para calibrar los tubos Pitot tipo S se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 3796-90 "Práctica Normalizada para Calibración de Tubos Pitot Tipo S". El método de calibración y el cálculo de incertidumbre se emplearán en el manual de calidad para acreditar al Laboratorio de Ingeniería y Térmica Aplicada (LABINTHAP), como laboratorio secundario en la calibración de este instrumento.

ANTECEDENTES

En 1997 el Instituto Politécnico Nacional creó el Programa Institucional de Metrología, Pruebas, Normalización y Calidad Industrial (PROMET), cuya función es acreditar los laboratorios de las escuelas que puedan dar un servicio de calibración o pruebas. En este marco, el PROMET coordina las actividades para acreditar al Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) de la SEPI-ESIME Zacatenco, en la calibración de tubos Pitot tipo S.

Para acreditar al LABINTHAP como laboratorio secundario se necesita elaborar el Manual de Calidad que incluye el procedimiento para calibrar tubos Pitot tipo S basándose en la norma ASTM D 3796-90. El método de calibración, el cálculo de incertidumbre y la aplicación de este método, son parte del manual de calidad, actividades que en este trabajo son presentadas.

NORMAS AMCA PARA VENTILADORES

El perfil de velocidades en la salida de un ventilador centrífugo no es uniforme. En la figura 1 se muestra que a 0% de longitud del ducto se tiene un perfil de velocidad no uniforme. La sección de ducto adherido en la descarga del ventilador controla la difusión no uniforme del flujo a la salida y establece un perfil de velocidad desarrollado donde se tiene el 100% de longitud efectiva del ducto como se muestra en la figura 1. Para calcular el 100% de longitud efectiva del ducto, se supone un mínimo de 2 1/2 diámetros de ducto por cada 12.7 m/s (2500 ft/min) o

menos. Además, se debe sumar 1 diámetro de ducto por cada 5.08 m/s (1000 ft/min) adicionales [1]. De acuerdo a lo anterior, en este caso se requiere analizar el comportamiento del flujo en el ducto de descarga del ventilador y demostrar que en el 100% de longitud efectiva del ducto, el perfil de velocidades se encuentra desarrollado y ubicar en este sitio la zona de pruebas para calibrar tubos Pitot tipo S.

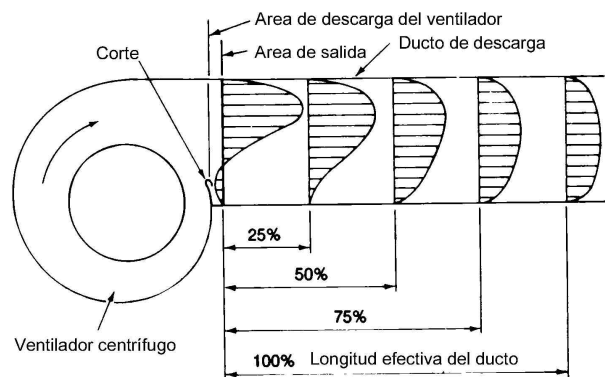


Figura 1 Perfiles de velocidad a la salida de un ventilador centrífugo.

TUBOS PITOT TIPO L Y S

El tubo Pitot tipo L es un instrumento que por medición de la presión total y estática registra la presión dinámica de una corriente de gas. Para un tubo Pitot L manufacturado bajo norma, se considera que su coeficiente es igual a 1, pero en aplicaciones de mayor precisión, el tubo debe ser calibrado

preferentemente por un laboratorio primario para conocer su coeficiente que es aproximadamente 1. Empleando la ecuación (1) se calcula la velocidad puntual con este instrumento:

$$V = C_{PL} \sqrt{\frac{2P_d}{\rho_{aire}}} \quad (1)$$

siendo C_{PL} el coeficiente del tubo Pitot tipo L, P_d , la presión dinámica y ρ_{aire} la densidad del aire.

El funcionamiento del tubo S es similar al del tubo Pitot L, a diferencia de éste, el tubo S posee únicamente un orificio para el registro de presión estática. Este instrumento debe estar alineado con el flujo para realizar las mediciones de velocidad por medio de la diferencia de presiones total y estática (presión dinámica), midiendo el orificio que se encuentra aguas abajo (lado A_s), la presión total de la corriente del fluido y el orificio que se encuentra aguas arriba del anterior (lado B_s), la presión estática. Debido al tamaño del orificio de presión estática, es adecuado para corrientes de gas con partículas, ya que éstas no obstruyen la toma de presión estática, como el caso del tubo Pitot L. La figura 2 muestra un tubo Pitot S. Este instrumento para su uso adecuado, debe ser calibrado en un intervalo de velocidades igual al que se va a utilizar.

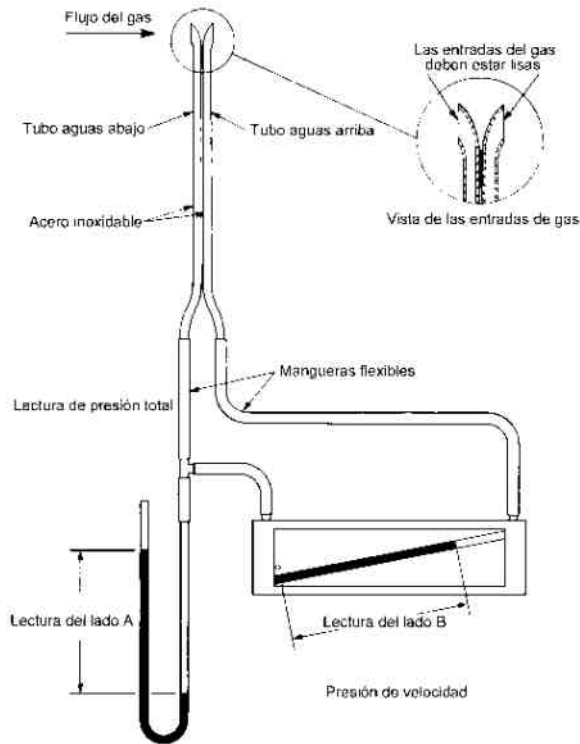


Figura 2 Tubo estático de Pitot tipo S.

INSTALACION EXPERIMENTAL

Para la calibración de los tubos S se empleó una instalación que consiste de un ventilador centrífugo accionado por un motor eléctrico de 11.19 kW (15 HP), la cual cuenta con un variador de velocidad que controla las RPM del motor eléctrico. Esta instalación experimental (figura 3) cumple con la norma ASTM D 3795-90.



Figura 3 Instalación experimental.

El ventilador tiene un ducto en la descarga de 0.30 m de diámetro y 3.90 m de longitud, con una zona de pruebas de 0.62 m de longitud. Para determinar la zona de pruebas en el ducto, se realizó un análisis de los perfiles de velocidad a diferentes diámetros de éste (planos de medición D2, D4, D6, D8 y D10), ubicándose la zona de pruebas en el plano D10 como se muestra en la figura 4.

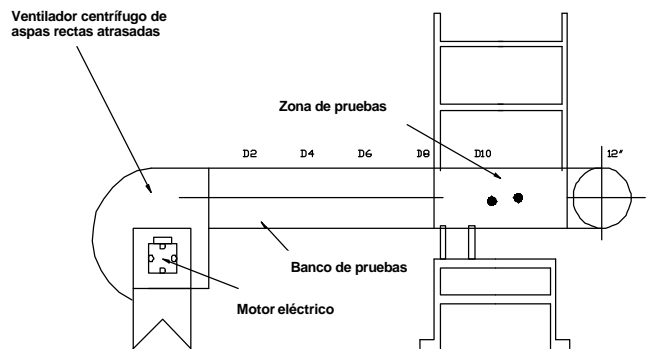


Figura 4 Planos de medición y zona de pruebas.

La instrumentación empleada en el desarrollo experimental es la siguiente: un tubo Pitot tipo L de nariz elipsoidal, un manómetro inclinado, un barómetro y un termómetro.

METODOLOGÍA PARA CALIBRAR TUBOS PITOT TIPO S

El método para la calibración de tubos Pitot tipo S se encuentra fundamentada en la norma ASTM D 3796-90 (Revisada en 1998) "Práctica Normalizada para Calibración de Tubos Pitot Tipo S". Este método se presenta a continuación:

Método de calibración

1. Asignar un número de identificación al tubo Pitot tipo S, una toma de presión del tubo con "A_S" y la otra con "B_S".
2. Arrancar el ventilador de la instalación experimental y permitir que el flujo se establezca en una de las cuatro velocidades en que se divide el intervalo de 5.08 a 25.4 m/s. Sellar el puerto de entrada del tubo Pitot tipo S.
3. Determinar un punto de calibración apropiado. Seleccionar un punto de calibración en o cercano al centro del ducto.
4. Conectar el tubo Pitot tipo L al manómetro diferencial. Colocar el tubo Pitot en el punto de calibración; la punta del tubo debe apuntar directamente hacia el flujo. Una vez que el tubo Pitot L esté en posición, sellar el puerto de entrada rodeando el tubo.
5. Tomar una lectura de presión diferencial con el tubo Pitot tipo L, registrar estos datos en la Tabla 1. Retirar el tubo Pitot L del ducto y desconectarlo del manómetro. Sellar el puerto de entrada del tubo Pitot tipo L.
6. Conectar el tubo Pitot tipo S al manómetro y abrir el puerto de entrada del tipo S. Insertar y alinear el tubo Pitot tipo S de modo que su abertura de impacto lado "A_S" esté colocada en el punto de calibración y apuntando hacia el flujo. Sellar el puerto de entrada rodeando el tubo.
7. Tomar una lectura de presión diferencial con el tubo Pitot tipo S; registrar este valor en la Tabla 1. Retirar el tubo Pitot tipo S del ducto; desconectar el tubo del manómetro. Sellar el puerto de entrada del tipo S.
8. Repetir los procedimientos del 4 al 7, hasta obtener tres pares de lecturas de presión diferencial.
9. Repetir los procedimientos 4 al 8 para el lado "B_S" del tubo Pitot tipo S.

Cálculo

1. En cada una de las posiciones de velocidad del lado A_S, calcule los tres valores de coeficientes del tubo Pitot tipo S, correspondientes a las corridas No. 1, 2 y 3 (Tabla 1); use la ecuación 2. Calcule el promedio (media) de estos tres valores de los coeficientes.

$$C_{PS} = C_{PL} \sqrt{\frac{\Delta P_L}{\Delta P_S}} \quad (2)$$

Donde:

C_{PS} Coeficiente del tubo Pitot tipo S.

C_{PL} Coeficiente del tubo Pitot tipo L.

ΔP_L Presión diferencial medida con el tubo Pitot L, kPa (in. H₂O o mm H₂O).

ΔP_S Presión diferencial medida con el tubo Pitot tipo S, kPa (in H₂O o mm H₂O).

Número de identificación del tubo Pitot _____ Fecha: _____

Calibrado por: _____

POSICIÓN DEL VENTILADOR	CORRIDA NO.	Calibración del lado A o B		DESVIACION C _p (S) - C _p	∇ ft/min (m/min)
		ΔP _{med} in.H ₂ O (mm H ₂ O)	ΔP _s in.H ₂ O (mm H ₂ O)		
A	1				
	2				
	3				
B	1				
	2				
	3				
C	1				
	2				
	3				
D	1				
	2				
	3				

Tabla 1 Datos de calibración por multivelocidad.

2. Calcular la velocidad promedio de la sección de pruebas correspondiente para el lado A_S y B_S para cada posición del ventilador, usando la ecuación:

$$\bar{v} = KC_{PL} \sqrt{\frac{T\Delta P_L}{P_b M}} \quad (3)$$

Donde:

\bar{v} Velocidad promedio en la sección de prueba en una posición particular del ventilador, m/s (ft/min).

K Constante = 2100 para unidades métricas, 5130 para unidades inglesas.

- C_{PL} Coeficiente del tubo Pitot tipo L.
- P_b Presión barométrica durante la calibración, (kPa), in Hg (mm Hg).
- M Peso molecular del aire, 29.0 lb/lb mol (g/g mol).
- T Temperatura de la corriente de aire durante la calibración, K (R).
- DP_L Promedio de las tres lecturas de presión del tubo Pitot L en una posición particular del ventilador, kPa (in. H₂O o mm H₂O).

$$C_{PS} = C_{PL} \sqrt{\frac{\Delta P_L}{\Delta P_S}} \quad (6)$$

$$dC_{PS} = \frac{\partial C_{PS}}{\partial \Delta P_L} d\Delta P_L + \frac{\partial C_{PS}}{\partial \Delta P_S} d\Delta P_S$$

$$dC_{PS} = \frac{1}{2} C_{PL} (\Delta P_S)^{-1/2} (\Delta P_L)^{-1/2} d\Delta P_L - \frac{C_{PL} (\Delta P_L)^{1/2} (\Delta P_S)^{-3/2}}{2} d\Delta P_S \quad (7)$$

$$C_{PS} = \pm 0.0032$$

3. Calcular los coeficientes medios del lado A_S y B_S del tubo Pitot tipo S, como sigue:

$$C_p(\text{lado } A_S \text{ o } B_S) = \frac{\sum_1^3 C_{PS}}{3} \quad (4)$$

siendo $C_p(\text{lado } A_S \text{ o } B_S)$ el coeficiente del lado A_S o B_S y C_{PS} el valor individual del coeficiente del tubo Pitot tipo S, lado A_S o B_S.

4. Restar el coeficiente medio del lado A_S del coeficiente del lado B_S. Tomar el valor absoluto de esta diferencia.
5. Calcular la desviación de cada uno de los valores del coeficiente del lado A_S y B_S de su valor medio como sigue:

Desviación (lado A_S o B_S) = $C_p(s) - C_p(\text{lado } A_S \text{ o } B_S)$

6. Calcular la desviación promedio del valor medio, para ambos lados A_S y B_S del tubo Pitot, como sigue:

$$\sigma(\text{lado } A_S \text{ o } B_S) = \frac{\sum_1^3 [C_p(s) - C_p(\text{lado } A_S \text{ o } B_S)]}{3} \quad (5)$$

siendo $\sigma(\text{lado } A_S \text{ o } B_S)$ la desviación promedio del valor de $C_p(s)$, del valor medio, lado A_S o B_S.

CALCULO DE INCERTIDUMBRE

Los valores para los siguientes cálculos fueron obtenidos de la referencia [5]. Para realizar el cálculo de incertidumbre se estima la derivada total del coeficiente de presión C_{PS} como se muestra en las ecuaciones 6 y 7:

En las ecuaciones anteriores no se considera la incertidumbre debida al coeficiente de presión del tubo Pitot tipo L, debido a que el método de calibración descrito en este trabajo se basa en la norma ASTM D3796, la cual recomienda emplear como instrumento de comparación un tubo Pitot tipo L de nariz elipsoidal del cual en esta norma se presenta una curva para obtener el coeficiente de este instrumento en función del diámetro del mismo y la ubicación de los orificios que registran la presión estática.

Para considerar la contribución de la incertidumbre del coeficiente del tubo Pitot tipo L, este se enviará al NIST para su calibración y conocer su coeficiente así como la incertidumbre.

Incetidumbre relativa

La incertidumbre relativa debida a ΔP_L y ΔP_S se obtiene de las diferencias de presiones de los tubos estáticos de Pitot tipo L y S, la cual permite calcular las incertidumbres individuales debidas a ΔP_L y ΔP_S .

$$u_{C_{PS}, \Delta P_L} = \frac{\partial C_{PS}}{C_{PS}} = \frac{\Delta P_L}{C_{PS}} \frac{\partial C_{PS}}{\partial \Delta P_L} u_{\Delta P_{\text{est}}} = \frac{u_{\Delta P_L}}{2} \quad (8)$$

$$u_{C_{PS}, \Delta P_S} = \frac{\partial C_{PS}}{C_{PS}} = \frac{\Delta P_S}{C_{PS}} \frac{\partial C_{PS}}{\partial \Delta P_S} u_{\Delta P_S} = -\frac{u_{\Delta P_S}}{2} \quad (9)$$

Empleando ΔP_L se obtiene:

$$u_{\Delta P_L} = \pm 0.0177 \quad \text{lado } A_S$$

$$u_{\Delta P_L} = \pm 0.0177 \quad \text{lado B}_S$$

Utilizando ΔP_S se tiene:

$$u_{\Delta P_S} = \pm 0.0127 \quad \text{lado A}_S$$

$$u_{\Delta P_S} = \pm 0.0129 \quad \text{lado B}_S$$

Incertidumbre combinada

La incertidumbre combinada debida a ΔP_L y ΔP_S arroja la incertidumbre total del coeficiente de presión de ambos lados del tubo S:

$$u_{C_{P_S}} = \pm \left[\left(\frac{u_{\Delta P_L}}{2} \right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta P_S}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

Incertidumbre combinada del lado A_S

$$u_{C_{P_S}} = \pm 0.01089 \quad \text{ó} \quad \pm 1.09\% \quad \text{lado A}_S$$

Incertidumbre combinada del lado B

$$u_{C_{P_S}} = \pm 0.01099 \quad \text{ó} \quad \pm 1.01\% \quad \text{lado B}_S$$

Incertidumbre combinada del lado A_S y B_S

$$u_{C_{P_S}} = \pm \frac{u_{C_{P_{SA}}} + u_{C_{P_{SB}}}}{2} = \pm \frac{0.01089 + 0.01099}{2}$$

$$u_{C_{P_S}} = \pm 0.0109 \quad \text{ó} \quad 1.09\%$$

Este valor de incertidumbre es el promedio de las incertidumbres obtenidas para ambos lados (lado A_S y B_S) del tubo Pitot tipo S.

Incertidumbre de la velocidad promedio

Para conocer la incertidumbre combinada se debe de estimar las incertidumbres individuales debidas a T, ΔP_L y P_b :

$$v = k C_p \sqrt{\frac{T \Delta P_L}{P_b M}} \quad (11)$$

$$d\bar{v} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial T} dT + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \Delta P_L} d\Delta P_L + \frac{\partial \bar{v}}{\partial P_b} dP_b \quad (12)$$

La incertidumbre relativa debida a T, ΔP_L y P_b es:

$$u_{v,T} = \frac{\partial \bar{v}_T}{\bar{v}} = \frac{T}{\bar{v}} \frac{\partial \bar{v}}{\partial T} u_T = \frac{u_T}{2} \quad (13)$$

$$u_{v,\Delta P_L} = \frac{\partial \bar{v}_{\Delta P_L}}{\bar{v}} = \frac{\Delta P_L}{\bar{v}} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \Delta P_L} u_{\Delta P_L} = \frac{u_{\Delta P_L}}{2} \quad (14)$$

$$u_{v,P_b} = \frac{\partial \bar{v}_{P_b}}{\bar{v}} = \frac{T}{\bar{v}} \frac{\partial \bar{v}}{\partial P_b} u_{\Delta P_b} = -\frac{u_{\Delta P_b}}{2} \quad (15)$$

La incertidumbre relativa en T, ΔP_L y P_b se obtiene sustituyendo los datos de las lecturas de los instrumentos de medición como son el termómetro, barómetro y el tubo estático de Pitot L, esto es:

$$u_T = \pm \frac{0.5 \text{ } ^\circ\text{C}}{21.725 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0.0230$$

$$u_{\Delta P_L} = \pm \frac{0.0032 \text{ kPa}}{0.18066 \text{ kPa}} = 0.0177$$

$$u_{\Delta P_b} = \pm \frac{0.05 \text{ kPa}}{79.37 \text{ kPa}} = 6.2996 \times 10^{-4}$$

El cálculo de la incertidumbre combinada de T, ΔP_L y P_b da como resultado la incertidumbre total de la velocidad promedio del tubo S:

$$u_{C_{P_S}} = \pm \left[\left(\frac{u_T}{2} \right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta P_L}}{2} \right)^2 + \left(-\frac{u_{P_b}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$u_{C_{P_S}} = \pm 0.0145 \quad \text{ó} \quad \pm 1.45\%$$

DISCUSIÓN

Perfiles de velocidad

La figura 5 muestra únicamente los perfiles de velocidad obtenidos en el diámetro D10 del ducto del ventilador. Los perfiles de velocidad se obtuvieron también en los planos D2, D4, D6, D8 y D10 que se muestran en la figura 4. De acuerdo a las normas AMCA, este tipo de perfiles se encuentran totalmente desarrollados para ubicar en este plano, la zona de calibración.

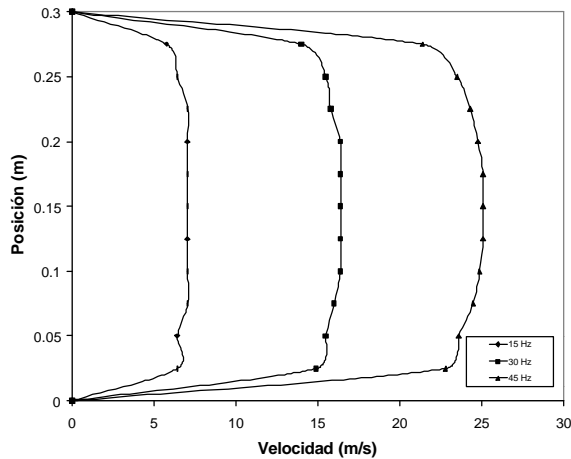


Figura 5 Perfiles de velocidad en D10.

Curva de Calibración

Se obtuvieron diversas curvas de calibración a diferentes intervalos de velocidad entre 5 y 30 m/s para el tubo Pitot tipo S del LABINTHAP, en la figura 7 se muestra la curva de calibración para un intervalo de velocidad de 20 a 30 m/s, cumpliendo con el criterio de que la diferencia entre los coeficientes de presión del tubo Pitot tipo S del lado A_s y B_s debe ser menor o igual a 0.01.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados presentados, la instalación para calibrar tubos Pitot S del LABINTHAP cumple con lo estipulado en la norma ASTM D 3796-90, así como con los criterios de las normas AMCA 210-74 y 201-90. La versatilidad de la instalación permite calibrar estos instrumentos de manera rápida y con la visibilidad adecuada para comprobar que los tubos S y L estén correctamente colocados dentro de la zona de pruebas.

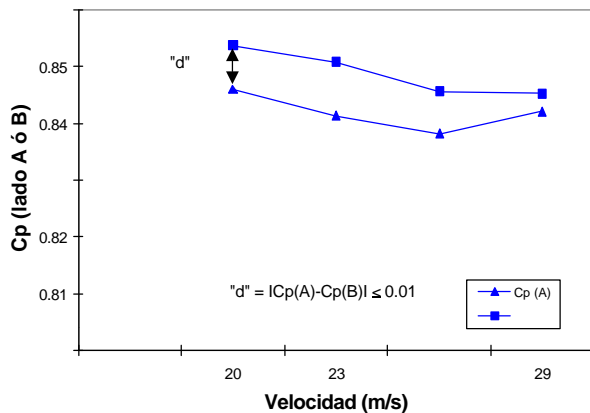


Figura 7 Curva de calibración para 20-30 m/s.

Los perfiles de velocidad del ducto de descarga del ventilador, cumplieron satisfactoriamente con los criterios que este tipo de instalación exige; principalmente respecto a tener en la zona de pruebas, perfiles de velocidad totalmente desarrollados.

El método implementado para calibrar estos instrumentos funciona correctamente, ya que en las diferentes calibraciones efectuadas, el Cp es menor o igual a 0.01. El cálculo de incertidumbre es otro aspecto fundamental en metrología, para este caso se obtuvo una incertidumbre total de 0.0145.

REFERENCIAS

- [1] Fan Application Manual. Air Movement and Control Association, 1987.
- [2] Standard Practice For Calibration of Type S Pitot Tubes. ASTM Designation: D 3796-90 (Reapproved 1998).
- [3] Munson Bruce R., Young Donald F. y Okiishi Theodore H. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. LIMUSA-WILEY. Primera Edición. 1999.
- [4] Measurement and Calibration for Quality Assurance. Morris A. S. Prentice-Hall. 1991.
- [5] Serrano A. C., Metodología para Calibrar Tubos Pitot Tipo S para Acreditar al LABINTHAP como Laboratorio Secundario. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana. 2000.