

Estimación de la incertidumbre para la selección de instrumentos de medición de la velocidad del aire en un tubo

Salcedo, Gustavo A.^{1,3}; Tarifa, Enrique E.^{2,3}; Lescano, Lara V.¹; Rosas, Domingo A.¹; Coronel, Eve L.¹;

(1) *Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero.*

lescanolaravaleria@gmail.com; inge.rosas@yahoo.com.ar; ecoronel@unse.edu.ar

(2) *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.*

eetarifa@fi.unju.edu.ar

(3) *CONICET.*

gusalc2.92@gmail.com

RESUMEN

El flujo de fluidos posee diversas aplicaciones ingenieriles. El objetivo de la presente investigación fue el análisis de la incertidumbre a través del cual se realizó la selección de instrumentos utilizados para el cálculo de la velocidad promedio del aire en un tubo a diferentes frecuencias de trabajo del soplante. Además, se determinó en forma experimental el coeficiente de descarga, a cada frecuencia de trabajo, para la placa orificio utilizada en las experiencias. Se estimaron las incertidumbres para todas las mediciones siguiendo la "Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición", una herramienta publicada por la Organización Internacional de Normalización. Los resultados obtenidos mostraron que la magnitud de dichas incertidumbres es función de la frecuencia y del instrumento de medición. Para frecuencias altas, el tubo Pitot conectado al manómetro en U presentó la menor incertidumbre; a bajas frecuencias, lo hizo el anemómetro analógico de hélice y, para frecuencias intermedias, lo hizo el anemómetro de Pitot digital. El manómetro digital presentó valores bajos de incertidumbre, pero fue siempre superado por otros instrumentos. Los valores del coeficiente de descarga obtenidos concordaron con los de bibliografía, presentaron una incertidumbre moderada, y podrán ser utilizados en futuras mediciones de velocidad.

ABSTRACT

Fluid flow has several engineering applications. The objective of the present investigation was the analysis of the uncertainty through which the selection of instruments used for the calculation of the average air velocity in a pipe at different working frequencies of the blower was carried out. In addition, the discharge coefficient was determined experimentally, at each working frequency, for the orifice plate used in the experiments. The uncertainties for all measurements were estimated following the "Guide for the expression of uncertainty in measurement", a tool published by the International Organization for Standardization. The results obtained showed that the magnitude of these uncertainties is a function of frequency and measuring instrument. For high frequencies, the Pitot tube connected to the U-shaped manometer presented the lowest uncertainty; at low frequencies, the analog propeller anemometer did, and for intermediate frequencies, the digital Pitot anemometer did. The digital manometer presented low uncertainty values, but was always outperformed by other instruments. The values of the discharge coefficient obtained were in agreement with those of the literature, presented a moderate uncertainty, and could be used in future velocity measurements.

Palabras claves: Velocidad del aire, tubo circular, incertidumbre, GUM.

Keywords: Air velocity, circular tube, uncertainty, GUM.

1. INTRODUCCIÓN

La medición del flujo en tuberías es indispensable para cualquier proceso que involucre fluidos en alguna de sus etapas (McCabe, 1991). White (2004) establece que las situaciones prácticas con fluidos en ingeniería se relacionan directamente con una medida precisa del flujo. Mott (2006) vincula la medición del flujo con aspectos tales como la contabilización de sustancias, el rendimiento de ciertas operaciones unitarias, el control de procesos y la investigación.

El sistema a estudiar en el presente trabajo es el tubo de alimentación de aire de un secadero de lecho fluidizado. El aire es suministrado por un soplante radial. En este tipo de secaderos, se requieren mediciones fiables y precisas de la velocidad del aire (Morales et al., 2014). Los dispositivos utilizados en la presente investigación realizan medidas indirectas de la velocidad promedio del aire. Estas mediciones, como cualquier otra, tienen cierta variabilidad. Dada la escasa investigación existente sobre la estimación y representación de dicha variabilidad para el equipo en estudio, en el presente trabajo se estima la incertidumbre asociada a la velocidad promedio medida por diversos instrumentos. Los dispositivos empleados para la medición de la velocidad promedio en este trabajo son los siguientes: tubo de Pitot conectado a un manómetro en U, anemómetro analógico de hélice, anemómetro de Pitot digital y manómetro diferencial digital.

El tubo en estudio tiene instalada una placa orificio. El coeficiente de descarga C_0 de esa placa se debe determinar experimentalmente (Geankoplis, 1998). Cada frecuencia de trabajo posee un valor de C_0 asociado. Para determinar dichos valores, se aplicó un procedimiento experimental y, luego, los resultados obtenidos se compararon con datos bibliográficos. Los valores obtenidos para C_0 podrán ser empleados en futuras mediciones de velocidad de aire en el mismo.

Según Jiménez López y Pallarés Ruiz (2007), cualquier procedimiento numérico debe considerar el control de la incertidumbre para establecer cómo se ve afectado el resultado. La incertidumbre puede propagarse de diferentes formas, ya sea considerando el valor absoluto del error experimental, la varianza, el método de Monte Carlo. En la presente investigación, se

prefirió trabajar con el método recomendado por la “Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición”. Este último es un método de referencia para la estimación y reporte de la incertidumbre en las mediciones y cálculos realizados (Gregory et al., 2005).

Por último, en función de la incertidumbre estimada para cada instrumento de medición de velocidad promedio, se eligió el mejor para determinados rangos de frecuencias de trabajo. También, se analizó la incertidumbre en el cálculo del coeficiente de descarga de la placa orificio para determinar el grado de concordancia entre los valores obtenidos experimentalmente y los de bibliografía.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Rango de trabajo

La utilización de distintos instrumentos para la medición propuesta puede arrojar diferentes valores para la misma frecuencia del soplante, por lo que resulta necesario estimar la incertidumbre asociada a las lecturas efectuadas. En las experiencias realizadas, se trabajó con frecuencias F en el rango de 5-60 Hz, tomando como valores intermedios múltiplos de 5 Hz, con una temperatura de aire $T = 30$ °C.

2.2. Tubo de Pitot

El primer instrumento de medición empleado consistió en un tubo de Pitot conectado a un manómetro en U. En adelante, se empleará el código PU para designar a este instrumento. Los tubos de Pitot se encuentran entre los patrones de calibración y verificación más utilizados (Yeh y Hall, 2007), razón por la cual los valores obtenidos por este instrumento se tomaron de referencia para el cálculo del coeficiente de descarga C_0 de la placa orificio utilizada en cada determinación. El tubo Pitot se colocó en el centro del tubo, por lo que se obtuvo la velocidad máxima $v_{m\acute{a}x}$ a través de la ecuación (1).

$$v_{m\acute{a}x} = C_p \sqrt{\frac{2(h_2 - h_1)(\rho_A - \rho)g}{\rho}} \quad (1)$$

C_p es un coeficiente adimensional, $h_2 - h_1 = \Delta h$ es la altura hidrostática en el manómetro en U, ρ_A es la densidad del agua, ρ es la densidad del aire y g es la aceleración de la gravedad.

A 30 °C, la viscosidad y densidad del aire son $1,86 \times 10^{-5}$ Pa s y $1,164 \text{ kg/m}^3$, respectivamente, y la densidad del agua es 996 kg/m^3 (Mott, 2006). Los valores calculados de $v_{\text{máx}}$ correspondieron al régimen turbulento ($N_{\text{Re}} > 4000$). Se recomienda la ecuación (2) para determinar la velocidad promedio para ese tipo de régimen (Miller, 1996).

$$v_{\text{prom}} = \frac{v_{\text{máx}}}{1 + 1,43 \sqrt{f_D}} \quad (2)$$

f_D es el coeficiente de fricción de Darcy.

En el centro del tubo, este modelo presenta errores experimentales absolutos del orden del 2,4-3,1 % a velocidades mayores de 8 m/s; mientras que, a velocidades inferiores, puede llegar hasta 6,6 % (Granados Avellaneda, 2016). El valor de f_D se calculó a partir de la ecuación (3), correspondiente a la expresión de Colebrook (Çengel y Cimbala, 2006).

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2,0 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{N_{\text{Re}} \sqrt{f_D}} \right) \quad (3)$$

ε es la rugosidad absoluta, D es el diámetro interno del conducto.

Dado que se trabajó con una tubería lisa, la rugosidad relativa pudo despreciarse, quedando la ecuación (3) reducida a la ecuación (4), conocida como ecuación de Prandtl, a través de la cual se calcula f_D por el método iterativo de bisección.

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = 2,0 \log_{10}(N_{\text{Re}} \sqrt{f_D}) - 0,8 \quad (4)$$

La velocidad promedio v_{prom} se obtuvo por iteración. Para ello, se inicializó dicha variable con el valor medido $v_{\text{máx}}$. Luego, se calculó N_{Re} . Con ese valor en la ecuación (4), se calculó f_D . Con este último, se calculó un nuevo valor para v_{prom} con la ecuación (2). Las iteraciones se detuvieron al alcanzar un error menor al 0,1 %.

2.3. Anemómetro analógico de hélice

El segundo instrumento empleado fue el anemómetro analógico de hélice OTA KEIKI SEISAKUSHO. El código que se asignó a este instrumento fue AAH. La medida que arroja es indirecta, ya que mide el recorrido de la aguja del instrumento en un determinado tiempo que, mediante la ecuación (5), permitió calcular la v_{prom} en m/s.

$$v_{\text{prom}} = \frac{(100n + N) 0,6 (D_{\text{anem}}^2 - D_{\text{reloj}}^2)}{t D^2} \quad (5)$$

n es el número de divisiones del reloj chico, N es el número de divisiones del reloj grande, t es el tiempo de medición en s, D_{anem} es el diámetro interno de la cubierta del anemómetro, D_{reloj} es el diámetro del reloj central y D es el diámetro interno del tubo.

Este instrumento se empleó para frecuencias menores de 30 Hz para respetar el rango de trabajo 1-15 m/s recomendado por el fabricante.

2.4. Anemómetro de Pitot digital

En tercer lugar, se trabajó con el anemómetro digital de Pitot TROTEC TA400. El código asignado a este instrumento fue APD. Este equipo mide la $v_{\text{máx}}$ en el centro del tubo, con la cual, a través de la ecuación (2), se consiguió la v_{prom} . En este caso, se empleó el mismo procedimiento iterativo explicado para el instrumento PU.

2.5. Manómetro diferencial digital

Por último, se empleó un manómetro diferencial digital EXTECH 407910. El código asignado a este instrumento fue MDD. Este equipo mide la diferencia entre las presiones aguas arriba y abajo de una placa orificio instalada en el tubo. Esta placa también estuvo instalada cuando se emplearon los tres instrumentos previamente presentados. En este caso, v_{prom} se obtuvo con la ecuación (6) en m/s.

$$v_{\text{prom}} = \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 C_0 Y \frac{\sqrt{196120 \Delta p}}{\sqrt{\rho \left[1 - \left(\frac{D_1}{D} \right)^4 \right]}} \quad (6)$$

D_1 es el diámetro interno de la placa orificio, D es el diámetro interno del tubo, C_0 es el coeficiente de descarga de la placa orificio (adimensional), Y es el factor de expansión (adimensional), Δp es la caída de presión a través de la placa orificio en kg/cm^2 y ρ es la densidad del aire en kg/m^3 .

2.6. Coeficiente de descarga de la placa orificio

El valor de C_0 utilizado en la ecuación (6) se calculó con la ecuación (7) para cada una de las frecuencias de trabajo del soplante. Esta vez, la diferencia de presión a través de la placa se midió con un manómetro en U. El código asignado a este cálculo fue C0.

$$C_0 = \frac{v_{\text{prom}} \sqrt{\rho \left[1 - \left(\frac{D_1}{D} \right)^4 \right]}}{Y \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \sqrt{2g(\rho_A - \rho)(h_2 - h_1)}} \quad (7)$$

El valor de v_{prom} utilizado en la ecuación (7) provino del resultado del instrumento PU.

Las tomas de presión del desarrollo experimental estuvieron ubicadas 24,3 mm aguas arriba y 28,1 mm aguas abajo de la placa orificio utilizada, dando lugar a la clasificación de *toma a la brida*. Esta última sirvió de referencia para seleccionar los valores teóricos de C_0 en bibliografía.

2.7. Estimación de la incertidumbre

La Organización Internacional para la Estandarización, junto a seis organizaciones vinculadas a la medición y estandarización, publicó la *Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición (International Organization for Standardization, 1993)*, referida como GUM por sus iniciales en inglés (*Guide to the expression of uncertainty in measurement*). El procedimiento recomendado por la GUM permite estimar la incertidumbre del resultado de un cálculo a partir de las incertidumbres conocidas de los datos.

La amplia base matemática de la GUM la habilita para abordar la mayoría de los problemas de incertidumbre en mediciones de variadas disciplinas (Gregory et al., 2005).

Los factores que influyen en el resultado final de un cálculo se denominan componentes de la incertidumbre, y una labor de suma importancia dentro de este análisis es identificar las distribuciones de las incertidumbres asociadas a ellos para que puedan combinarse (Gregory et al., 2005). La GUM hace uso de tres elementos para cada componente de incertidumbre: la incertidumbre estándar u , los grados de libertad ν y el coeficiente de sensibilidad c .

De acuerdo a Gregory et al. (2005), el método GUM consta de cuatro pasos principales, las cuales se presentan a continuación.

2.7.1. Modelado de la medida

Implica la construcción de un modelo de la medida, a través de una ecuación que relaciona los componentes de incertidumbre con el resultado final. En la presente investigación, los modelos estuvieron representados por las

ecuaciones empleadas para el cálculo de las velocidades medias. Este paso, por un lado, orienta en la identificación de los componentes de incertidumbre y, por otro, permite encontrar los valores de c para los mismos.

2.7.2. Cálculo de valores para u , ν y c

En esta etapa, se calculan la incertidumbre estándar u y los grados de libertad ν , según se trate de una incertidumbre tipo A o B. El tipo A (como el caso de las diferencias de alturas en el manómetro en U) considera la distribución estadística de los valores que provienen de una serie de mediciones. En este caso, u equivale a la desviación estándar estimada de la población de mediciones, mientras que ν es igual a los grados de libertad de esa estimación. El tipo B (como la densidad del aire proporcionada por bibliografía), en lugar de mediciones, emplea funciones de densidad de probabilidad escogidas con base en la práctica u otra información (Centro Español de Metrología, 2012). En esta evaluación, generalmente se asignan dos tipos de distribución de incertidumbre: normal y rectangular (Gregory et al., 2005). En la Tabla 1, se especifica la distribución que se asignó a cada variable del presente trabajo.

Tabla 1. Distribución de incertidumbre para la evaluación tipo B en las diferentes mediciones. Los criterios empleados para la selección de la distribución se basaron en JCGM (2008).

Código	Variable	Distribución
PU	C_p, ρ_A, ρ, g	Rectangular
	Δh	Normal
AAH	$D, t, D_{\text{anem}}, D_{\text{reloj}}$	Normal
APD	$v_{\text{máx}}$	Normal
MDD	ρ, Y	Rectangular
	D_1, D	Normal
C0	ρ_A, ρ, g, Y	Rectangular
	D_1, D, h_1, h_2	Normal

Para una distribución rectangular, la incertidumbre estándar se calcula con la ecuación (8), donde U_i es la incertidumbre reportada.

$$u_i = \frac{U_i}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

Si se trabaja con la distribución normal, el rango $\pm U_i$ representa el 95 % de las mediciones, por lo que se aplica en la ecuación (9) un factor de cobertura $k = 1,96$ (JCGM, 2008).

$$u_i = \frac{U_i}{1,96} \quad (9)$$

El valor del coeficiente de sensibilidad c se estimó a través de la diferenciación del modelo con respecto al correspondiente componente de incertidumbre (Gregory et al., 2005).

2.7.3. Cálculo de u_{comb} y v_{eff}

A través de la ecuación (10), se calculó la incertidumbre estándar combinada u_{comb} . Se consideran N componentes de incertidumbre, y se asume que no hay correlación entre ellos.

$$u_{\text{comb}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i u_i)^2} \quad (10)$$

Los grados de libertad efectivos v_{eff} se calcularon a través de la ecuación (11), conocida como fórmula de Welch-Satterthwaite.

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_{\text{comb}}^4}{\sum_{i=1}^N \left[\frac{(c_i u_i)^4}{v_i} \right]} \quad (11)$$

2.7.4. Indicación del resultado final

La GUM reporta la incertidumbre expandida, U , calculada a través de la ecuación (12). Se trabaja con el 95 % de probabilidad de contener el valor verdadero.

$$U = u_{\text{comb}} k \quad (12)$$

El resultado final y U se redondean al mismo dígito menos significativo, y el proceso de redondeo no introduce una incertidumbre significativa (Gregory et al., 2005).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Velocidad promedio en el tubo

Las velocidades promedio calculadas a diferentes frecuencias se muestran en la Fig. 1 para todos los instrumentos utilizados. Dado el rango de trabajo informado por el fabricante para el instrumento AAH, se mantuvo $F \leq 30$ Hz en las experiencias realizadas con este dispositivo.

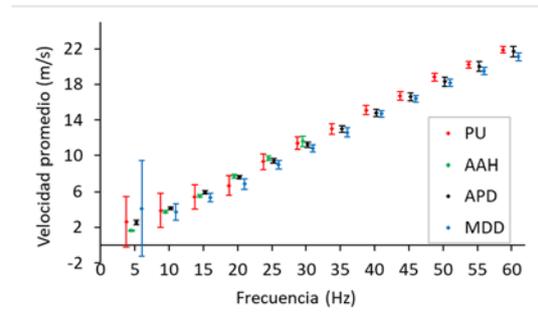


Figura 1. Comparación de resultados obtenidos por los diferentes instrumentos de medición. Fuente: Elaboración propia.

El instrumento PU presentó una disminución de la incertidumbre a frecuencia creciente, como se observa en la Fig. 2, dado que los valores del coeficiente de sensibilidad c de la diferencia de altura manométrica Δh decrecieron a medida que aumentó la frecuencia. Algo similar ocurrió con la desviación estándar u del coeficiente de fricción de Darcy f_D , la cual decreció hasta $F = 20$ Hz, y luego permaneció constante.

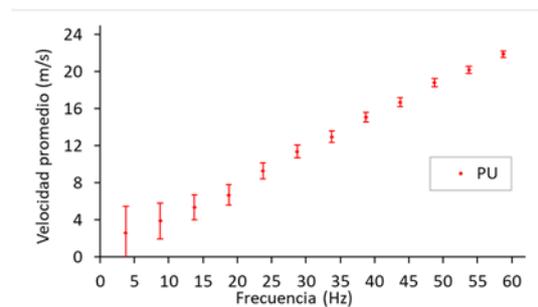


Figura 2. Resultados aislados de velocidad promedio e incertidumbre para el instrumento PU. Fuente: Elaboración propia.

En el instrumento AAH, la desviación estándar u del valor del recorrido de la aguja se incrementó con la frecuencia, por esta razón, y contrariamente a lo ocurrido con PU, este ensayo exhibió un aumento de la incertidumbre para frecuencia creciente, tal como se muestra en la Fig. 3. A valores de $F \leq 25$ Hz, este instrumento es el que menor margen de incertidumbre presentó.

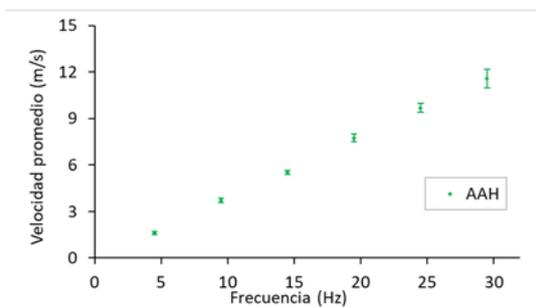


Figura 3 Resultados aislados de velocidad promedio e incertidumbre para el instrumento AAH. Fuente: Elaboración propia.

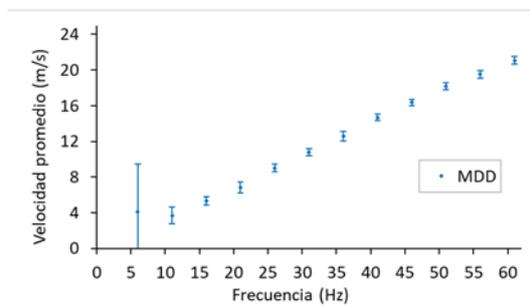


Figura 5. Resultados aislados de velocidad promedio e incertidumbre para el instrumento MDD. Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo que AAH, el método APD expuesto en la Fig. 4, exhibió un aumento de la incertidumbre a frecuencia creciente. Esto se debe a que la precisión del anemómetro informada por el fabricante varía linealmente con la lectura efectuada. Este efecto se potenció con el aumento progresivo del coeficiente de sensibilidad c del coeficiente de fricción de Darcy f_D . Cuando la frecuencia osciló entre 25-45 Hz, los mejores resultados se obtuvieron con este instrumento.

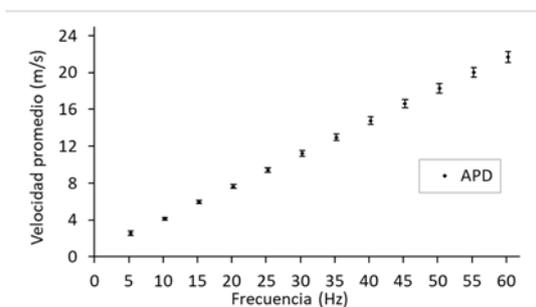


Figura 4. Resultados aislados de velocidad promedio e incertidumbre para el instrumento ADP. Fuente: Elaboración propia.

Una alta incertidumbre se observó en la Fig. 5 cuando $F = 5$ Hz en el método MDD. A esta frecuencia, el coeficiente de sensibilidad c de la lectura Δp del instrumento fue elevado. A partir de $F = 15$ Hz, la incertidumbre se mantuvo en un rango moderado.

En la elección del instrumento de medición a utilizarse en cada frecuencia de trabajo del soplate radica la importancia del presente trabajo. El empleo de la GUM, una guía estandarizada, contribuye a la credibilidad de los resultados reportados.

Ante los resultados obtenidos, puede ser de interés analizar en un futuro trabajo la utilización de un anemómetro de hilo caliente para todo el rango de velocidades, dado que el mismo es un dispositivo recomendado para gases según White (2004).

3.2. Coeficiente de descarga de la placa orificio

Los valores de C_0 calculados se muestran en la Fig. 6, donde la regresión lineal presenta el mejor ajuste.

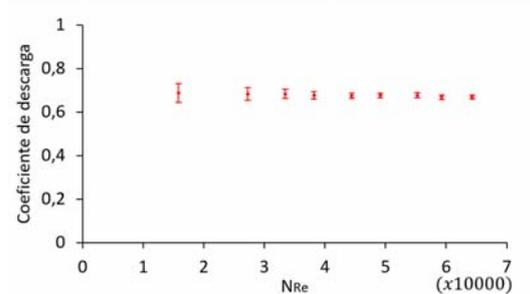


Figura 6. Coeficiente de descarga en función del número de Reynolds. Fuente: Elaboración propia.

Para $N_{Re} < 10700$, los valores obtenidos no concuerdan con los de bibliografía, presentando además una alta incertidumbre. Cuando $17000 <$

$N_{Re} < 64000$, los valores calculados de C_0 disminuyen de 0,675 hasta 0,655. Estos resultados concuerdan en mayor medida con los reportados por Potter (2015), entre 0,68 y 0,635. Según ASME (1959), el valor de C_0 está entre 0,630, a velocidades bajas, y 0,609, a la máxima frecuencia. Perry y Green (1997) propone un valor de C_0 constante e igual a 0,62. White (2004) plantea valores entre 0,612 para un $N_{Re} = 70000$ y 0,627 para $N_{Re} = 10000$. Geankoplis (1998) y McCabe et al. (1991) postulan que para $N_{Re} < 20000$, el valor de C_0 se mantiene constante e igual a 0,61.

Como presenta la Figura 6, a partir del cuarto valor, $F = 20$ Hz, la incertidumbre toma valores moderados. Como, a mayor frecuencia, la incertidumbre disminuye, la desviación estándar u de la velocidad promedio calculada para el instrumento PU también lo hace.

4. CONCLUSIÓN

En este trabajo, mediante la aplicación del estándar GUM para la propagación de la incertidumbre, se logró realizar una selección adecuada de instrumentos para medir la velocidad promedio del aire en un tubo. El instrumento PU se recomienda para la medición de la velocidad a frecuencias superiores a 45 Hz; mientras que, por debajo de 25 Hz, conviene trabajar con el instrumento AAH. Cuando la frecuencia oscila entre 25-45 Hz, los mejores resultados se obtienen con el instrumento ADP. MDD es medianamente adecuado para $F \geq 15$ Hz, pero en cada rango de frecuencia es superado por otro instrumento.

Los valores de C_0 calculados concordaron con los obtenidos de bibliografía y presentaron una incertidumbre moderada, razón por la cual pueden ser utilizados en futuras mediciones con la placa orificio en las condiciones de operación establecidas en esta investigación.

5. REFERENCIAS

ASME Research Committee on Fluid Meters (1959). *Fluid Meters: Their Theory and Application* (5a. ed.). Nueva York: American Society of Mechanical Engineers, p. 148).
Çengel Y., Cimbala J., *Mecánica de Fluidos*. (1ª. Ed.), McGraw-Hill, 2006.
250-79.,2007.

Centro Español de Metrología (2012). *VIM. Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. (3a. ed.). España: JCGM.
Geankoplis, C. J., *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (3a. ed.), Compañía Editorial Continental, S. A. de C. V., México, 1998.
Granados Avellaneda, E. G., Madolet Pinto, C., Comparación de modelos teóricos para caracterización del régimen turbulento en el túnel de viento WSL20 del CDT de gas, *MET&FLU*, 1(12), 13-24, 2016.
Gregory, K., Bibbo, G., Pattison, J. E., A standard approach to measurement uncertainties for scientists and engineers in medicine, *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 28 (2), 131-139, 2005.
JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology), *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. (1a ed.), 2008.
Jiménez López, V., y Pallarés Ruiz, A., *Métodos numéricos*, 2007.
McCabe, W. L., Smith, J. C., y Harriott, P., *Operaciones unitarias en Ingeniería Química* (4a. ed.), McGRAW – HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U., España, 1991.
Miller, R. W., *Flow Measurement Engineering Handbook* (3ª. ed.), McGraw-Hill, Nueva York, Estados Unidos, 1996.
Morales, O. A., Gómez, A., Vázquez, R., Medición de perfiles de velocidad en túnel de viento, *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 1, no. 2., 2014.
Mott, R. L., *Mecánica de fluidos* (6a. ed.), PEARSON EDUCACIÓN, México, 2006.
Perry, R. H., Green, D. W., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. (7a. ed.), McGraw-Hill Companies Inc., Estados Unidos, 1997.
Potter, M. C., Wiggert, D. C., Ramadan, B. H., *Mecánica de fluidos* (4a. ed.), Cengage Learning Editores, S. A. de C. V., México, 2015.
White, F. M., *Mecánica de Fluidos*. (5a. ed.), McGRAW – HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U., España, 2004.
Yeh, T. T., y Hall, J. M., Airspeed calibration service, *National Institute of Standards and Technology*, NIST special publication,