

DISEÑO EXPERIMENTAL Y CONSTRUCCIÓN DE UN SENSOR PARA MEDICIÓN DE FLUJO MASICO DE AIRE EN APLICACIONES HVAC.

Experimental design and construction of a flow mass measure sensor for hvac applications.

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados del estudio para el diseño experimental y construcción de un sensor para medición de flujo masico de aire en aplicaciones HVAC. Este instrumento es una herramienta de diagnostico que permite estimar un importante componente del balance térmico de edificios, con el cual evaluar el funcionamiento global de sistemas de acondicionamiento de aire durante su fase de operación y/o diseño.

PALABRAS CLAVES: Sensor de flujo masico de aire, instrumentación, análisis de incertidumbre.

ABSTRACT

This article presents the results of the study for the experimental design and construction of a sensor for mass air flow rate measurement to HVAC applications. This instrument is a diagnose tool that allows evaluate an important component buildings thermal balance, with which evaluate the global operation of air conditioning systems during its operation and/or design phase.

KEYWORDS: Mass flow rate sensor, instrumentation, uncertainty analysis.

1. INTRODUCCIÓN

En aplicaciones HVAC, un componente importante del balance térmico, poco estudiado hasta ahora, es el flujo de aire de ventilación. Este parámetro requiere ser estimado con cierto grado de exactitud en cámaras climáticas de ensayo de componentes HVAC.

En una cámara diseñada y construida para evaluar el comportamiento térmico de ventanas, inicialmente se decidió sellar todas las rendijas de la construcción, para minimizar el ingreso del aire que pudiera alterar su balance de energía. Como el resultado obtenido no fue satisfactorio, se decidió usar un sistema de impulsión de aire exterior, cuyo objetivo principal es medir la renovación del aire e impedir que fluctué sin control. Como se requiere un nivel bajo de infiltraciones (considerando que se trata de enfocar los esfuerzos sobre lo que ocurre con la carga térmica causada por la ventana), el flujo de aire inyectado en la cámara se fija en 0,02 Kg/s, lo que implica infiltraciones del orden de 0,65 ren/h. Con esto, se logra (mediante el sello previo de la cámara) mantener una diferencia de presiones de 25 Pa, adecuada para este tipo de experiencias [1], [2]. Para flujos de aire bajos como los registrados en esta aplicación, los sistemas de medición comúnmente utilizados presentan en el mejor de los casos incertidumbres hasta de un 25% [3].

Con el instrumento presentado en este trabajo se busca reducir la incertidumbre en esta medición con el fin de

mejorar los resultados experimentales en el ensayo de componentes HVAC.

2. SELECCIÓN DEL SISTEMA

Existen varios métodos para medir la variación del flujo volumétrico o de masa. En general su principio básico de operación consiste en disminuir el área de flujo para producir un incremento en su velocidad, acompañado de la correspondiente caída de presión, que permita calcular su velocidad, mediante una conexión a un manómetro o transductor diferencial de presión. Los sistemas más utilizados [3], se muestran en la Figura 1.

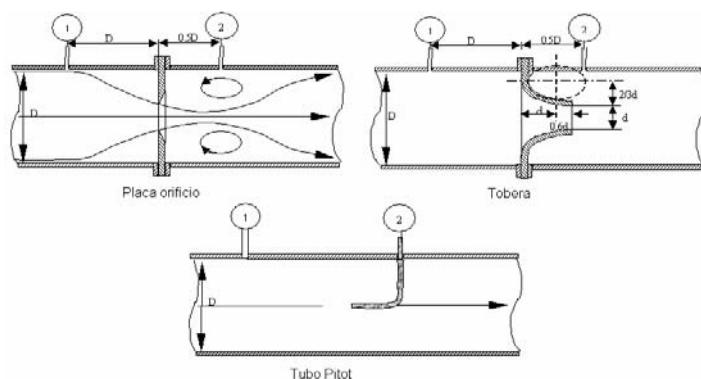


Figura 1. Sistemas tradicionales de medición de flujo masico de aire.

Un obstáculo en el escurrimiento, implica un aumento en

el nivel de la turbulencia. Luego en medidores con cambio brusco de área, se produce el efecto de vena contracta en el cual el chorro del fluido alcanza un área mínima [4]. Este efecto es cuantificado mediante el llamado coeficiente de descarga C_D (relación entre el flujo calculado y el teórico).

Cada uno de los métodos mostrados en la Figura 1, presenta sus ventajas y desventajas. La placa orificio por ejemplo, es más sencilla de implementar, pero su coeficiente de descarga es del orden de 0,6. La tobera, con un coeficiente de descarga del orden de 0,93, está diseñada para lograr un perfil de velocidades plano a la salida, eliminando la corrección que se tendría que hacer por fluctuaciones debidas a la turbulencia. Sin embargo, la diferencia de presiones antes y después de ella es demasiado alta, generando incertidumbres elevadas sólo por la ubicación de los sensores [5]. Por su parte, el tubo de Pitot provee un método simple y preciso para medir el flujo másico, cuando se tiene un escurrimiento paralelo a la cañería relativamente libre del efecto de la turbulencia. Cuando esto no ocurre, por ejemplo por efecto de flujos helicoidales, la lectura de la presión estática al usar el tubo de Pitot puede no ser representativa y las incertidumbres elevadas.

En el caso del tubo de Pitot, se utiliza el coeficiente C_p para cuantificar el efecto sobre la medición de factores como la viscosidad del fluido, geometría del sistema y desalineamiento respecto al flujo. De acuerdo a datos experimentales [3]. C_p varía en función de la velocidad del fluido, tomando valores cercanos a la unidad para $Re > 1000$, lo cual implica una ventaja comparativa frente a otros sistemas de medición.

La desventaja del tubo de Pitot, es la sensibilidad a cualquier tipo perturbación en el flujo, lo que implica que se debe medir en una zona libre de singularidades. En estas zonas generalmente las diferencias de presión son muy leves, por lo tanto, es necesario usar un transductor diferencial de presión de alta precisión.

Considerando el grado de precisión requerido y la facilidad de construcción y montaje, se seleccionó un dispositivo compuesto por una tobera y un tubo de pitot acoplado a un sensor diferencial de presiones. Se mide la diferencia, entre la presión total (tubo de pitot) y la presión estática (pared de la cañería) a la salida de la tobera, donde se inicia nuevamente el crecimiento de la capa límite y donde el efecto de la turbulencia es leve, capitalizando de esta forma las ventajas de ambos sistemas.

3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL SISTEMA

Para minimizar el efecto de las singularidades del sistema de cañerías sobre la medición (codos, ventilador etc...), se instala la tobera entre dos tramos de cañería, uno en PVC de 1 m de largo y otro en cobre de 50 cm de largo, con 46 y 20 mm de diámetro interno respectivamente.

El diseño utilizado para la tobera, corresponde a una variación del diseño original de la Figura 1, elaborado por el Instituto Norteamericano del Intercambio de Calor

y validado por ASME [6],[7]. Las dimensiones de la tobera bajo la norma y la pieza terminada, se presentan en la Figura 2.

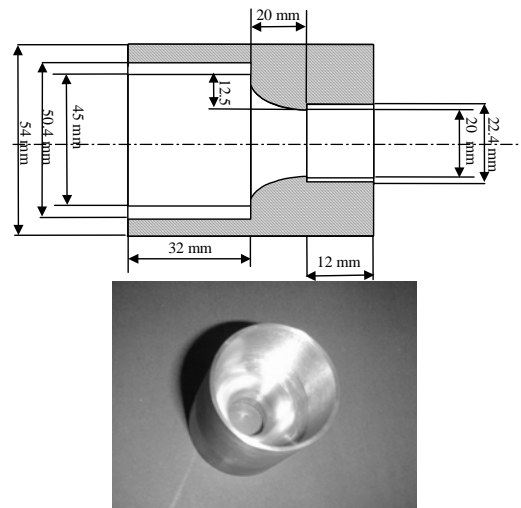


Figura 2. Tobera

La ubicación de la toma de presión estática total y las dimensiones del tubo de Pitot, se observan en la Figura 3.

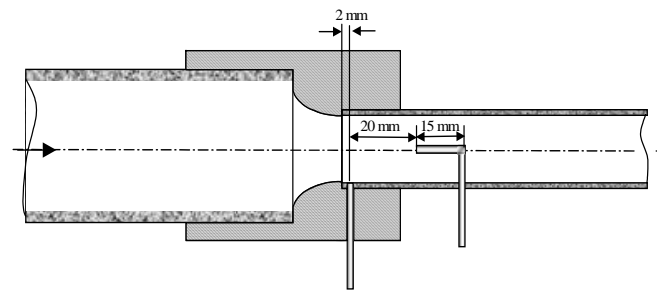


Figura 3. Distribución de la toma de presión estática y total

La toma de presión estática ubicada a 2 mm del final de la zona elíptica de la tobera, permite minimizar la incertidumbre debida al incremento en el espesor de la capa límite, considerando que en este punto inicia nuevamente su desarrollo.

La distancia entre la toma de presión dinámica y estática debe ser mínimo de un diámetro, para que la punta del Pitot no afecte la lectura de presión estática, según recomendación ASME. Finalmente, la longitud del horizontal del tubo de Pitot y su diámetro, facilitan su elaboración y montaje dentro de la cañería figura 3.

El montaje final, incluyendo el transductor diferencial de presión y el tubo de Pitot utilizado, se observa en la Figura 4.

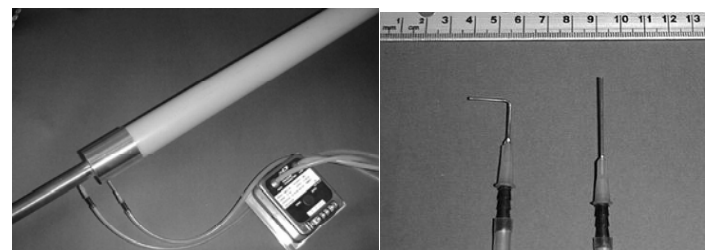


Figura 4. Sistema de medición de flujo masico de aire.

Transductor diferencial de presión

El manómetro o transductor diferencial de presión utilizado, entrega una salida de corriente de 4 a 20 mA y requiere una fuente de alimentación de 13 a 36 VCD.

Se utilizó una fuente de 13,8 VDC que cumple con los requerimientos del instrumento dados por el fabricante. Debido a que el instrumento está diseñado para aire seco y limpio, se incorporó al sistema un filtro de aire para asegurar que en condiciones de operación continua, el aire cumpla con estos requerimientos.

El instrumento cuenta con un certificado de calibración, cuyos valores fueron verificados en un túnel de viento, utilizando un manómetro inclinado marca DWYER como patrón y un amperímetro digital para la medición de la señal del instrumento. El resultado fue la correspondencia total de los valores del certificado con las lecturas realizadas, por lo tanto, se utilizaron los valores del certificado para establecer la curva de operación del instrumento.

Tubo de Pitot

El tubo de Pitot utilizado tiene un milímetro de diámetro interior y fue calibrado en el túnel de viento con respecto a un tubo de Pitot patrón ($C_p = 1$); para esto se realizó un montaje en el cual los dos tubos comparten la misma presión estática y mediante una válvula se alterna la lectura de la diferencia de presiones con la presión dinámica de cada Pitot. Se supone por lo tanto similar la configuración geométrica de la toma de presión estática en los dos instrumentos.

Se utilizó para la calibración un manómetro inclinado DWYER con resolución 0,01 pulgadas columna de agua y rango de 0-3 Kpa; el resultado de la calibración se muestra en la Tabla 1.

Tubo de Pitot	Diferencia de presión en pulgadas columna de agua		
Patrón	0.25	0.15	0.04
Prueba	0.25	0.15	0.04

Tabla 1. Datos de calibración del tubo de Pitot

Los resultados indican que C_p para el tubo de Pitot de prueba es igual a uno. Es importante tener en cuenta que debido a las limitaciones de resolución del instrumento transductor utilizado, podría presentarse una incertidumbre del orden del 1% de la lectura, en la determinación de C_p [3].

4. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE

Además de la incertidumbre en la determinación del flujo de masa, se presentan otros factores como la posición de la medición de la presión estática y la forma del perfil de velocidades que influyen directamente en su precisión [8], [9], [10]. La incertidumbre total U_{Tm} , en la medición de flujo de aire, puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$U_{Tm} = \sqrt{(U_{Dm})^2 + (U_{FP})^2 + (U_{PPE})^2} \quad [1]$$

Donde:

U_{Dm} = Incertidumbre en la determinación del flujo de masa.

U_{FP} = Incertidumbre debida a la forma del perfil de velocidades.

U_{PPE} = Incertidumbre debida a la posición de la presión estática.

Incertidumbre en la determinación del flujo de masa

El flujo de masa teórico dm/dt ó \dot{m} a través de un área dA , en los alrededores de un punto, puede ser expresada como:

$$\dot{m}_{teorico} = \rho V dA \quad [2]$$

Luego:

$$\dot{m} = \int_A \rho V dA \quad [3]$$

El número de Mach calculado para esta aplicación es de 0,01, por lo tanto, se considera como flujo incompresible, debido a que las variaciones causadas por los cambios en la densidad son despreciables. Esto implica que el término de la densidad en la ecuación [3], pueda ser factorizado de la integral obteniendo la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \rho V_o A \quad [4]$$

Es importante mencionar que la determinación de la velocidad, implica una incertidumbre debida a la deformación del perfil de velocidades en las cercanías de la pared de la cañería, la cual será tratada en detalle mas adelante.

La velocidad puede ser calculada aplicando la ecuación de Bernoulli entre dos puntos sobre la misma línea de corriente. Recordando que ésta no considera los efectos viscosos, se obtiene la siguiente expresión:

$$V_o = \sqrt{\frac{2(DP)}{\rho}} \quad [5]$$

Por lo tanto, el tubo de Pitot, debe ser calibrado mediante la siguiente ecuación:

$$V_o = C_p \sqrt{\frac{2(DP)}{\rho}} \quad [6]$$

De las ecuaciones [5] y [6], se obtiene la siguiente expresión general para el cálculo del flujo de masa:

$$\dot{m} = C_p * A * \sqrt{2 * \rho * (DP)} \quad [7]$$

Aplicando la expresión clásica de propagación de incertidumbre sobre la ecuación [7], se obtiene la siguiente ecuación para el cálculo de incertidumbre en la determinación del flujo de masa:

$$U_{\text{dm}} = \left[\left(\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial C_p} \right) * U_{C_p} \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial D} \right) * U_D \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} \right) * U_\rho \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial DP} \right) * U_{DP} \right)^2 \right] * \frac{100}{\dot{m}} \quad [\%] \quad [8]$$

Donde:

U_D = Incertidumbre en la medición del diámetro de la cañería (0,0005 m, medido con pie de metro).

U_{C_p} = Incertidumbre en la determinación de C_p (0,01 definida previamente).

U_ρ = Incertidumbre en la medición de la densidad del aire (detallada más adelante).

U_{DP} = Incertidumbre en la medición del diferencial de presión (detallada más adelante).

Incertidumbre en la densidad del aire

La variación en la densidad puede presentarse por cambios en la temperatura del aire. Como ésta temperatura no se mide directamente en la zona donde se ubica el sensor, se estima con base en las mediciones de la temperatura del aire a la entrada y salida del sistema de impulsión. Se concluye que puede variar máximo en dos grados durante este trayecto, esto implica una incertidumbre máxima en el cálculo de la densidad de:

$$U_\rho = 0,006\rho [kg / m^3] \quad [9]$$

Incertidumbre en la medición del diferencial de presión

$$U_{DP} = \left[\sqrt{U_{TC}^2 + U_{Corriente}^2} \right] * \frac{DP}{100} \quad [\text{Pa}] \quad [10]$$

Donde:

U_{TC} = Incertidumbre total de calibración, tomada de la curva de calibración del fabricante (0.5%).

$U_{Corriente}$ = Incertidumbre en la medición de señal de salida en corriente del sensor.

Para el cálculo de la corriente se tiene:

$$I = \frac{V}{R}$$

Por lo tanto la incertidumbre asociada a la medición de corriente puede ser expresado como:

$$U_{\text{Corriente}} = \left[\sqrt{\left(\left(\frac{\partial I}{\partial R} \right) * U_R \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial I}{\partial Vol} \right) * U_{Vol} \right)^2} \right] * \frac{100}{I} \quad [\%] \quad [11]$$

Donde:

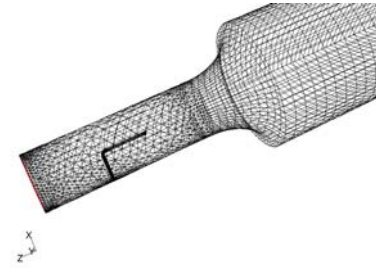
$$U_{Vol} = 0,05 * \frac{V}{100} + \frac{0,01 * 12 * V}{100}$$

$$U_R = 0,1 * \frac{R}{100} + 2 * \text{Resolución} [\Omega]$$

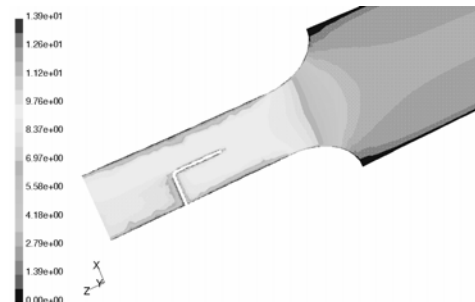
Incertidumbre debida a la forma del perfil de velocidades

Se origina porque dentro de la capa límite, la velocidad del flujo es diferente a la velocidad promedio en la cañería. Esto implica que a mayor espesor de la capa límite, la incertidumbre en la medición aumenta.

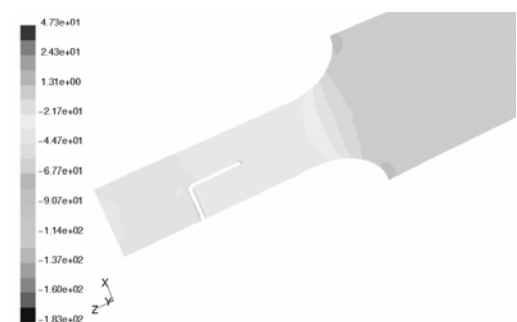
A la salida de la tobera se logra un perfil de velocidades plano, es decir, un espesor mínimo de la capa límite. Por lo tanto la medición debe hacerse lo más cerca posible de este punto.



Malla.



Contornos de magnitud de velocidad (m/s).



Contornos de presión estática (pascal)

Figura 5. Resultados del análisis CFD en 3D

Para determinar esta incertidumbre, se debe conocer el perfil de velocidades en la zona de medición. La teoría existente sobre el tema, considera perfiles de velocidad para flujo laminar o turbulento en una zona donde la capa límite está plenamente desarrollada, es decir, sin perturbaciones antes ni después de la zona de estudio.

En vista de que la teoría existente desde el punto de vista analítico no es aplicable en este caso, se elaboró un modelo del escurrimiento, mediante el análisis por métodos numéricos CFD (Computational Fluid Dynamics) y el programa FLUENT-Licencia UDC. Los resultados para esta simulación se muestran en la Figura 5.

Inicialmente se modeló el escurrimiento en tres dimensiones, para determinar el efecto del tubo de Pitot sobre el sistema. Las características de esta simulación son las siguientes:

- Modelo 3D con 417.702 celdas: se generó una malla híbrida, es decir, con elementos hexagonales regulares ordenados tipo HEX/ en la zona de la tobera y aguas arriba, considerando que en esta zona el escurrimiento presenta una dirección bien definida. En la zona del Pitot la geometría se complica, por lo tanto, se utiliza un esquema de mallado con tetraedros TET/, el cual permite refinar la malla cerca del Pitot y mejorar la precisión del modelo.
- Modelo de viscosidad k-epsilon RNG zonal de dos capas: entrega los mejores resultados cerca de la pared.
- Solver Segregado implícito: para flujo incompresible; requiere menos recursos computacionales.
- Esquema de discretización de segundo orden: para obtener una mayor exactitud.
- Entradas del modelo: inicialmente se modeló el escurrimiento para lograr 1 ren/h, por lo tanto, las entradas del modelo son: Velocidad del flujo a la entrada $V = 1,61$ m/s y geometría del sistema.

En la Figura 5, se observa que la vertical del tubo de Pitot no produce perturbación alguna sobre el flujo en la zona de medición, sin embargo, la capa límite en la pared del tubo no queda bien representada en este modelo 3D. Por lo tanto, se optó por elaborar un segundo modelo teniendo en cuenta sólo el tubo horizontal del Pitot, pero usando una malla de mejor calidad en la cercanía de las paredes de la cañería y del Pitot; para esto se usó un modelo 2D axisimétrico.

Las características de la simulación en este caso son las siguientes:

- Modelo 2D Axisimétrico con 76.590 celdas.
- Modelo de viscosidad k-epsilon RNG zonal de dos capas.
- Solver Segregado implícito.
- Esquema de discretización de segundo orden.
- Entradas del modelo: adecuadas para lograr las condiciones de operación, 0,65 ren/h.
 $V = 1,04$ m/s.
Geometría del sistema.

Incertidumbre en la forma del perfil de velocidades

En la Figura 6, se observa el inicio del crecimiento de la capa límite justo a la salida de la tobera.

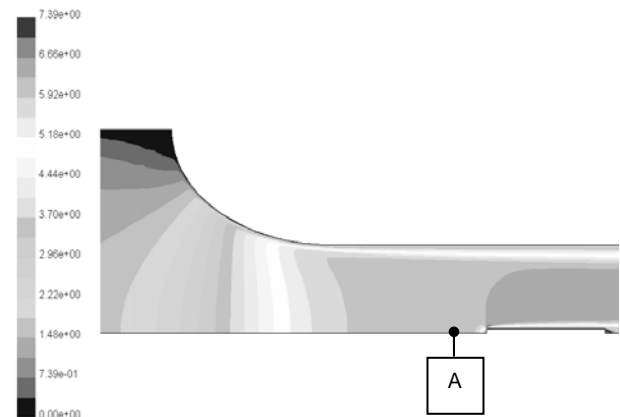


Figura 6. Resultados CFD contornos de velocidad -Modelo 2D

Calculada mediante los resultados del modelo CFD, la incertidumbre en la forma del perfil corresponde al flujo determinado por el modelo en el punto de medición (A) (Figura 6), relativo al flujo teórico ideal en el mismo punto (sin el efecto de la capa límite, es decir, considerando la misma velocidad en toda la sección). Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$U_{FP} = \frac{m_{A\text{ Ideal}} - m_{A\text{ Modelo}}}{m_{A\text{ Ideal}}} * 100 \quad [\%] \quad [12]$$

De los valores de la simulación se tiene:

$$U_{FP} = \frac{0,0021298856[\text{Kg/s}] - 0,0020529357[\text{Kg/s}]}{0,0021298856[\text{Kg/s}]} * 100 = 3,61[\%]$$

Es importante mencionar que se considera el punto A, como lugar de la medición de la velocidad del fluido y no la punta del tubo de Pitot, para evitar la perturbación que este genera en los resultados del modelo.

Incertidumbre en la posición de la presión estática

La medición ideal debería evaluar simultáneamente la presión estática y total en el mismo lugar (A) (Figura 7). Sin embargo, la perturbación causada por el tubo de Pitot sobre la medición de la presión estática sería considerable. La incertidumbre en la posición de la presión estática corresponde por lo tanto, a la diferencia de presión entre los puntos de medición (A y B) figura 7, relativa al punto ideal de medición en A, calculada mediante los resultados del modelo CFD y la siguiente expresión:

$$U_{PPE} = \frac{P_{EA} - P_{EB}}{P_{EA}} * 100 \quad [\%] \quad [13]$$

Como se observa en la Figura 7, la presión estática en A es la misma de la punta del Pitot si éste no existiera, por lo tanto, se considera como valor ideal para el cálculo de incertidumbre.

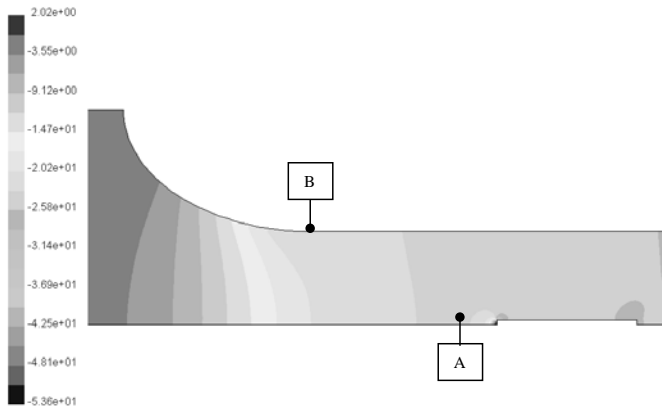


Figura 7. Resultados CFD contornos de presión estática

De los valores obtenidos de la simulación en FLUENT se tiene:

$$U_{PPE} = \frac{23,84936[Pa] - 21,96938[Pa]}{23,84936[Pa]} = 7,88 \quad [\%]$$

En la Figura 8, se aprecia el comportamiento de la presión estática dentro de la cañería en los puntos A y B. Se asumieron valores promedio para el cálculo de incertidumbre.

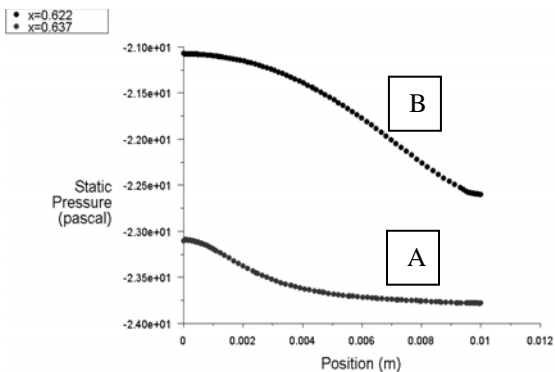


Figura 8. Perfiles de presión estática en los puntos de medición

Se consideran para el análisis de incertidumbre los siguientes datos:

- DP = 0,075 pulgadas columna de agua, correspondientes a la lectura del sensor para un flujo de infiltraciones de 0,65 Ren/h.
- Lectura de voltaje = $1,28e-2$ V.
- D = 20 mm.
- $\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3$, para una temperatura de 20°C .

Con estos valores y resolviendo simultáneamente las ecuaciones [1], [10] y [11], se obtiene una incertidumbre total en la medición del flujo de aire de:

$$U_{Tm} = 12,2 \%$$

Las componentes de la incertidumbre total en la medición del flujo de aire son las siguientes:

$$U_{Dm} = 8,5\%.$$

$$U_{FP} = 3,6\%.$$

$$U_{PPE} = 7,9\%.$$

5. CONCLUSIÓN

Se ha planteado la metodología y resultados del análisis experimental para el diseño de un sensor de flujo masico de aire, de utilidad en el campo de la climatización, para el ensayo de componentes HVAC. Este sensor permite medir flujos de aire del orden de 0,02 a 0.1 Kg/s con una incertidumbre total máxima de 12.2 % de la cantidad medida. Como era de esperarse, La componente más importante de la incertidumbre total, corresponde a la determinación del flujo de masa U_{Dm} (debido especialmente a la incertidumbre en la medición de la diferencia de presiones), seguida por la incertidumbre en la posición de la presión estática U_{PPE} . El primero depende básicamente de las características de los instrumentos en el mercado para este caudal y el segundo, de la distancia mínima para evitar que la punta del Pitot afecte la medición.

Finalmente, se puede decir que la componente debida al perfil de velocidades U_{FP} , fue atenuada correctamente por el diseño del sistema.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] FONSECA Néstor. Estudio experimental del balance térmico de una ventana, Tesis de Maestría, Universidad de Concepción Chile, 2002.
- [2] ASHRAE, "Handbook-Fundamentals", ASHRAE, Atlanta U.S.A, 2001.
- [3] Fox, R.W.1978. "Mecánica de fluidos", McGraw-Hill, México.
- [4] Benedict, Robert P.1977. "Fundamentals of temperature pressure, and flow measurements", John Wiley & Sons Inc. USA.
- [5] Ernest O.Doebelin.1990 "Measurement systems application and design", Mc.Graw Hill.Boston.
- [6] James W. Dally.1984. "Instrumentation Engineering measurement", Wiley, New York.
- [7] L.K.Spink.1949. "Principles and practice of flow meter Engineering", Foxboro, Mass.
- [8] ASHRAE. Engineering Analysis of Experimental Data, ASHRAE Guideline, ASHRAE, Atlanta USA,1986.
- [9] JAMES, W. DALLY. Instrumentation Engineering measurement, Wiley, New York, 1984.
- [10] HOLMAN J.P. Experimental methods for engineers, McGraw-Hill, New York, N. Y, 1985.