

INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE FLUJO MÁSSICO MEDIANTE UNA PLACA DE ORIFICIO

Roberto Arias Romero

Nota: El presente ejercicio ha sido desarrollado bajo aspectos didácticos y lleva por esto algunas simplificaciones. Para aplicarlo a un caso específico, deben tomarse en cuenta los resultados particulares de esa medición o calibración, informes y certificados de calibración, características de los equipos, métodos, condiciones ambientales, habilidades del personal y todos los elementos relevantes particulares de ese sistema de medición.

El Marqués, Qro., México, abril de 2001.

INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE FLUJO MÁSSICO MEDIANTE UNA PLACA DE ORIFICIO

Roberto Arias Romero

Abril, 2001

Resumen: Se presenta la estimación de la incertidumbre de la medición de flujo másico mediante una placa de orificio concéntrica, de borde recto, con tomas de presión en bridas.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de medición de flujo de fluidos del tipo de presión diferencial son ampliamente usados en el sector industrial. En particular, las placas de orificio gozan de una ventaja comparativa importante: existe en la literatura una gran cantidad de información relacionada con el comportamiento de estos elementos, incluidas diferentes normas de referencia para el diseño, construcción, instalación y uso de los elementos de presión diferencial.

Aún cuando este tipo de instrumentos ha sido empleado desde principios del siglo XX en diversas industrias; hoy día, cerca de 25% del total de instrumentos para medición de flujo de fluidos instalados a nivel internacional son del tipo de presión diferencial. En particular, la industria del transporte de gas natural hace uso de una gran cantidad de placas de orificio para realizar la medición del gas que es transportado de un lugar a otro.

1. PRINCIPIO DE MEDICIÓN Y MENSURANDO

Como mensurando se considera el flujo másico, esto es la masa por unidad de tiempo que atraviesa una superficie dada como el mensurando.

La medición de flujo másico por medio de elementos de presión diferencial se basa en las leyes de conservación de la masa y de la energía. Combinando ambas leyes es posible relacionar el flujo másico (o volumétrico) con la caída de presión que se presenta al pasar a través del elemento primario. La ecuación que se emplea para el cálculo de flujo másico de fluidos es la siguiente [1],

$$q_m = \frac{C_d \varepsilon_1 \pi d_T^2}{4\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2\Delta P \rho_1} \quad (1)$$

donde

C_d : coeficiente de descarga, [adimensional]

ε_1 : coeficiente de expansibilidad, [adimensional]

Para fluidos compresibles y cuando se usa una placa de orificio como elemento primario de medición se usa la siguiente ecuación para su estimación,

$$\varepsilon_1 = 1 - \left(0,41 + 0,35 \beta^4\right) \frac{\Delta P}{\kappa P_1} \quad (2)$$

donde

ΔP : presión diferencial a través de la placa de orificio, [MPa]
 β : relación de diámetros, [adimensional]

$$\beta = \frac{d_T}{D_T} \quad (3)$$

donde

d_T : diámetro de la placa, a la temperatura de trabajo, [m]

D_T : diámetro de la tubería adyacente, a la temperatura de trabajo, [m]

$$d_T = d_0 (1 + \alpha_d \cdot (T - T_0)) \quad (4)$$

$$D_T = D_0 (1 + \alpha_D \cdot (T - T_0)) \quad (5)$$

α_d : coef. lineal de expansión térmica de la placa, [1/°C]

α_D : coef. lineal de expansión de la tubería, [1/°C]

κ : exponente isentrópico del fluido a la temp. y presión de trabajo, [adim]

P_1 : presión del fluido aguas arriba de la placa, [Pa]

ρ_1 : densidad del fluido a las condiciones existentes en la toma de presión aguas arriba, [kg/m³]

La placa de orificio consiste en una placa delgada que se puede colocar entre las bridas de dos tubos. Como su geometría es muy simple, su costo es bajo y se puede fácilmente instalar o remplazar. La arista que forma el orificio generalmente es muy afilada de tal modo que no se forman depósitos en ella. En la instalación típica de las placas de orificio (ver fig. 1), las tomas de presión se encuentran localizadas a distancias de D y $D/2$ veces el diámetro de la tubería, aguas arriba y aguas abajo respectivamente. Otro arreglo comúnmente empleado es el de posicionar las tomas de presión en las bridas adyacentes a la placa de orificio. Tales tomas de presión son

maquinadas en forma radial en el cuerpo de las bridas y se les conoce como "**tomas de presión en brida**" (flange tappings). Si las tomas de presión son maquinadas en diagonal, de tal forma que el orificio de toma de presión quede posicionado justamente en ambos costados de la placa, se denominan "**tomas de presión esquinadas**" (corner tappings). El posicionamiento de las tomas de presión afecta el coeficiente de descarga. En las normas internacionales es posible encontrar el valor del coeficiente de descarga para cada uno de los tipos de tomas de presión.

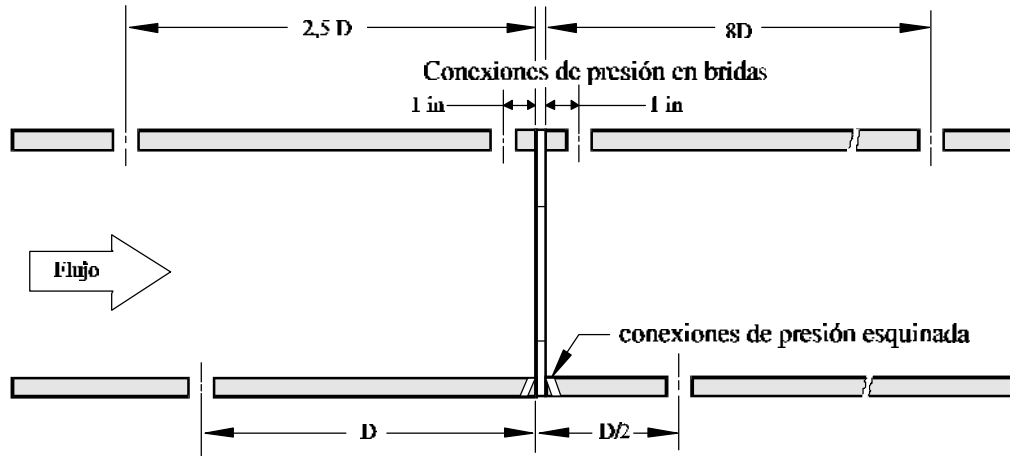


Fig. 1 Tomas de presión en placas de orificio

La predicción de los coeficientes de descarga en placas de orificio ha requerido de una gran cantidad de investigación y trabajo experimental por parte de los principales institutos involucrados en la medición de flujo de fluidos. Como resultado, se han publicado diversas expresiones para el cálculo del coeficiente de descarga en placas de orificio de borde recto, entre ellas la más popular debida a Stolz, recomendada por la norma, toma la siguiente forma

$$C_d = 0,5959 + 0,031\beta^{2,1} - 0,184\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} \left(\frac{10^{06}}{Re_D} \right)^{0,75} + 0,09L_1\beta^4(1-\beta^4)^{-1} - 0,0337L_2'\beta^3 \quad (6)$$

donde

Re_D : es el número de Reynolds calculado según el diámetro D de la tubería calculado como

$$Re_D = \frac{v \cdot D \cdot \rho_l}{\eta} \quad (7)$$

expresión en la cual:

v : Velocidad del fluido, [m/s].

D : Diámetro interno de la tubería a condiciones de operación, [m].

η : Viscosidad Dinámica del fluido, [Pa-s]
 ρ_1 : densidad del fluido aguas arriba de la placa, [kg/m³]

$L_1=l_1/D$: es la relación que existe entre la distancia l_1 , medida desde el plano de las tomas de presión aguas arriba hasta la cara aguas arriba de la placa de orificio y el diámetro de la tubería

$L_2=l_2/D$: es la relación que existe entre la distancia l_2 , medida desde el plano de las tomas de presión aguas abajo hasta la cara aguas abajo de la placa de orificio y el diámetro de la tubería

2. FUENTES DE INCERTIDUMBRE

De acuerdo con los modelos matemáticos expresados con anterioridad, las variables que contribuyen a la incertidumbre de medición del flujo másico por medio de una placa de orificio son las siguientes:

C_d : coeficiente de descarga (según calibración o norma de referencia), [adimensional]
 d_T : diámetro de la placa, a la temperatura de prueba, [m]
 D_T : diámetro de la tubería adyacente, a la temperatura de prueba, [m]
 α_d : coeficiente de expansión térmica de la placa, [1/°C]
 α_D : coeficiente de expansión térmica de la tubería, [1/°C]
 ϵ_1 : coeficiente de expansibilidad (según propiedades aguas arriba), [adimensional]
 ΔP : presión diferencial a través de la placa de orificio, [Pa]
 T : temperatura de trabajo, [°C]
 P : presión del fluido en toma aguas arriba, [Pa]
 ρ_1 : densidad del fluido a la presión y temperatura de trabajo, [kg/m³]
 κ : exponente isentrópico, a las condiciones de trabajo, [adimensional]
 η : viscosidad dinámica del fluido, [Pa s]

Coefficiente de descarga, C_d : El valor del coeficiente de descarga puede ser obtenido de alguna norma de referencia [1], o bien mediante la calibración de la placa de orificio contra algún sistema de referencia de medición de flujo de fluidos. Las contribuciones dominantes a la incertidumbre del coeficiente de C_d siguen distribuciones normales, y debido al teorema del límite central, es razonable atribuir a esta variable C_d una distribución de probabilidad normal.

Diámetro de la placa, d_0 : El diámetro de la placa de orificio debe ser estimado a partir de varias mediciones, realizadas con algún instrumento con trazabilidad. Un valor de incertidumbre típico para el diámetro de una placa de orificio es del orden de 0,05 %, para niveles de confianza del orden de 95 %. De acuerdo con la norma ISO 5167, la incertidumbre no debe exceder 0,07 %.

Diámetro de la tubería, D_0 : El diámetro de la tubería debe ser estimado a partir de varias mediciones, realizadas con algún instrumento con trazabilidad. Un valor de incertidumbre típico para el diámetro de la tubería adyacente es del orden de 0,25 %, para niveles de confianza del orden de 95 %. De acuerdo con la norma ISO 5167, la incertidumbre no debe exceder 0,4 %.

Coefficiente de expansión térmica de la placa, α_d : Normalmente, el valor del coeficiente de expansión térmica de los materiales se obtiene a partir de la literatura especializada. Consultas en diferentes fuentes de información pueden proporcionar información acerca de la variabilidad en el valor de este coeficiente. Típicamente, un valor de incertidumbre estándar de $1e-6 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ es empleado para cálculos de incertidumbre.

Coefficiente de expansión térmica de la tubería, α_D : Normalmente, el valor del coeficiente de expansión térmica de los materiales se obtiene a partir de la literatura especializada. Consultas en diferentes fuentes de información pueden proporcionar información acerca de la variabilidad en el valor de este coeficiente. Típicamente, un valor de incertidumbre estándar de $1e-6 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ es empleado para cálculos de incertidumbre.

Coefficiente de expansibilidad, ε_1 : El valor del coeficiente de expansibilidad (ec. 2) fue determinada en forma experimental, por lo que su uso implica una contribución a la incertidumbre en el cálculo del flujo másico. En la norma ISO 5175 [1], se establece un valor de incertidumbre relativa (en porciento) igual a $4 \times DP/P_I$ respecto del valor del coeficiente de expansibilidad. Se asume este valor con un nivel de confianza del orden de 95%, y se tipifica como una fuente de incertidumbre tipo B.

Presión diferencial a través de la placa de orificio, ΔP : Para esta contribución deben tomarse en cuenta la calibración del sistema de medición de presión diferencial, además de la dispersión de los datos por mediciones sucesivas. Típicamente, un medidor de presión diferencial de aplicación industrial puede medir presión diferencial con incertidumbre del orden de 0,5% a un nivel de confianza de 95% cuando es calibrado con un sensor de referencia con trazabilidad.

Temperatura de trabajo, T: Para esta contribución deben tomarse en cuenta la calibración del sistema de medición de temperatura, además de la dispersión de los datos por mediciones sucesivas. Típicamente, un sistema de medición de temperatura instalado en campo, e integrado por termopozo, sensor tipo Pt-100 (4 hilos), transmisor y dispositivo indicador puede lograr valores de incertidumbre del orden de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (incertidumbre expandida, $k=2$) cuando es calibrado con un sistema de referencia apropiado.

Presión del fluido aguas arriba, P_1 : La presión del fluido aguas arriba de la placa de orificio contribuye a la incertidumbre del flujo másico de fluido debido a dos razones: a) su calibración contra algún patrón de referencia y b) la dispersión en mediciones repetitivas.

Densidad del fluido, ρ_1 : La densidad puede ser obtenida de alguna ecuación de estado para el fluido o bien puede ser medida. Cualquiera que sea el caso, debe incorporarse la incertidumbre estándar al cálculo de la incertidumbre estándar combinada para el flujo másico. Si la densidad es obtenida de tablas o de alguna ecuación de estado entonces debe también tomarse en cuenta la influencia de la temperatura y la presión.

Exponente isentrópico, k: La fuente de información para obtener el mejor valor para κ puede servir como referencia para asociar un valor de incertidumbre a esta variable aleatoria.

Viscosidad dinámica del fluido, η : El valor de viscosidad puede obtenerse de tablas o de algún modelo matemático específico; o bien por medio de algún instrumento de medición en línea. En cualquier caso, es necesario estimar el valor de incertidumbre estándar asociado.

3. COMBINACIÓN

Se aplica la ley de propagación de incertidumbre al modelo matemático (ec. 1) para estimar la incertidumbre estándar combinada para el flujo másico. En la fig. 2 se muestra un diagrama esquemático de las relaciones entre las variables que intervienen en la definición del mensurando,

$$u_c(q_m) = \sqrt{\left[\left[\frac{\partial q_m}{\partial C_d} \cdot u(C_d) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial d_0} \cdot u(d_0) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial D_0} \cdot u(D_0) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial \alpha_d} \cdot u(\alpha_d) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial \alpha_D} \cdot u(\alpha_D) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial T} \cdot u(T) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial P_1} \cdot u(P_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial \Delta P} \cdot u(\Delta P) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial \rho_1} \cdot u(\rho_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \cdot u(\varepsilon_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial \kappa} \cdot u(\kappa) \right]^2 + \left[\frac{\partial q_m}{\partial \eta} \cdot u(\eta) \right]^2 \right.}$$

(8)

En el Anexo B se muestra un diagrama las relaciones entre las variables y fuentes que contribuyen a la incertidumbre.

Los coeficientes de sensibilidad se obtienen en su mayoría de los modelos matemáticos presentados con anterioridad y para algunos casos, los coeficientes pueden obtenerse de gráficos, tablas, experiencia, etc.

$$\frac{\partial q_m}{\partial C_d} = \frac{q_m}{C_d}$$

(9)

$$\frac{\partial q_m}{\partial d_0} = \frac{\partial q_m}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial d_0} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial d_0} + \frac{\partial q_m}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial d_0} + \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial d_0}$$

(10)

$$\frac{\partial q_m}{\partial D_0} = \frac{\partial q_m}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial D_0} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial D_0} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial D_0} + \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial D_0}$$

(11)

$$\frac{\partial q_m}{\partial \alpha_d} = \frac{\partial q_m}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial \alpha_d} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial \alpha_d} + \frac{\partial q_m}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial \alpha_d} + \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial \alpha_d} \quad (12)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \alpha_D} = \frac{\partial q_m}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial \alpha_D} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial \alpha_D} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial \alpha_D} + \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial \alpha_D} \quad (13)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \eta} = \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial \eta} \quad (14)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \kappa} = \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \kappa} \quad (15)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} = \frac{q_m}{\varepsilon_1} \quad (16)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \Delta P} = \frac{\partial q_m}{\partial \Delta p} + \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \Delta p} \quad (17)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \rho} = \frac{\partial q_m}{\partial \rho} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial \rho} \quad (18)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial P} = \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial P} + \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial P} + \frac{\partial q_m}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial T_m} &= \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial T_m} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial T_m} + \frac{\partial q_m}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial T_m} + \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial T_m} + \\ &+ \frac{\partial q_m}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial T_m} + \frac{\partial q_m}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial T_m} + \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial T_m} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial T_m} + \\ &+ \frac{\partial q_m}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial T_m} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial T_m} + \frac{\partial q_m}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial T_m} + \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial T_m} \end{aligned} \quad (20)$$

4. INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

Para expresar el intervalo de incertidumbre a un nivel de confianza del orden de 95%, se requiere encontrar un valor apropiado del factor de cobertura k , que multiplicará al valor de la incertidumbre estándar previamente estimada. La GUM [3], recomienda el siguiente modelo matemático para estimar la incertidumbre expandida,

$$U = u_c \cdot t_p(v_{ef}) \quad (15)$$

donde:

- u_c : incertidumbre estándar combinada
- t_p : factor de student al nivel de confianza p
- v_{ef} : grados efectivos de libertad

EJEMPLO NUMÉRICO

Estimar la incertidumbre de medición del flujo másico de vapor cuando se mide mediante una placa de orificio de borde recto con tomas de presión del tipo D y 0,5D, y se conocen los siguientes datos,

C_d :	coeficiente de descarga,	$= 0,608\ 47 \pm 0,002\ 17$
ΔP :	Presión diferencial a través de la placa,	$= (26\ 783 \pm 121)\ \text{Pa}$
P_m :	presión del fluido aguas arriba,	$= (400\ 000 \pm 1\ 442,5)\ \text{Pa}$
T_m :	temperatura del fluido,	$= (693 \pm 2,25)\ \text{K}$
T_0 :	temperatura de referencia para diámetros,	$= 293\ \text{°K}$
ρ_T :	densidad del fluido a la temp.y presión de trabajo,	$= (1,256\ 7 \pm 0,001\ 9)\ \text{kg/m}^3$
ϵ_1 :	coeficiente de expansibilidad,	$= 0,974\ 30 \pm 0,001\ 33$
d_0 :	diámetro de la placa a la temperatura de referencia,	$= (0,141\ 28 \pm 0,000\ 03)\ \text{m}$
D_0 :	diámetro de la tubería a la temperatura de referencia,	$= (0,202\ 21 \pm 0,000\ 25)\ \text{m}$
α_d :	coeficiente de expansión térmica de la placa,	$= (17 \cdot 10^{-6} \pm 1 \cdot 10^{-6})\ 1/\text{K}$
α_D :	coeficiente de expansión térmica de la tubería,	$= (12 \cdot 10^{-6} \pm 1 \cdot 10^{-6})\ 1/\text{K}$
κ :	exponente isentrópico,	$= 1,287 \pm 0,012\ 87$
β :	relación de diámetros,	$= 0,699\ 987$
Re_D :	número de Reynolds,	$= 719\ 999$
v :	velocidad,	$= 141,75$
η :	viscosidad dinámica,	$= (2,44 \cdot 10^{-6} \pm 1,24 \cdot 10^{-7})\ \text{Pa s}$
q_m :	flujo másico,	$= 2,803\ 79\ \text{kg/s}$

Los valores de incertidumbre que se anotan en los datos anteriores se expresan en forma estándar. En la Anexo A se indican todas las contribuciones, así como el valor de la incertidumbre estándar combinada para el flujo másico. Los valores de las propiedades termodinámicas del vapor de agua se obtuvieron de ASME [2]. La ecuación que se usa para determinar el valor del coeficiente de descarga es la ecuación de Stoltz; de la cual se calculan también los coeficientes de sensibilidad respecto de la relación de diámetros, β , y respecto del número de Reynolds.

5. DISCUSIÓN

De los resultados obtenidos para el ejercicio numérico propuesto (medición de flujo de vapor recalentado mediante una placa de orificio), se puede concluir que las contribuciones debidas a la incertidumbre en el valor de la viscosidad dinámica del fluido, del exponente isentrópico, y del coeficiente de expansión térmica de la tubería son despreciables.

En aplicaciones cercanas a la temperatura ambiente las fuentes de incertidumbre de mayor preponderancia son: el coeficiente de descarga, la presión diferencial a través de la placa de orificio, el coeficiente de expansibilidad, la densidad del fluido, el diámetro interno de la placa de orificio y el diámetro de la tubería.

6. REFERENCIAS

- [1] ISO 5167-1 “Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices” – Part 1 Orifice plates nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross section conduits running full; Geneve, 1991.
- [2] ASME Software, “ Properties of water and steam using the 1967 IFC formulation for industrial use”
- [3] ISO Guide to the expression of uncertainty in Measurement”, International Organization for Standardization, Geneva, 1993
- [4] ISO 5168 “Measurement of fluid flow – Estimation of uncertainty of a flow rate measurement”, Geneva, 1978

Autor: Roberto Arias Romero,
Coordinador Científico de la División de Flujo y Volumen, CENAM,
rarias@cenam.mx,
Tel +52 (4) 211 05 00 ext. 3765; Fax +52 (4)211 05 00 ext. 3776.

ANEXO A. PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE

	Magnitud de entrada Xi Fuente de incertidumbre	Valor estimado x _i	Inc. original	Distribución	Tipo	Incertidumbre estandar u(x _i)	Coefficiente de sensibilidad c _i	Contribución u _i (y)	(u _i (y)) ²	Grados de libertad
1	Coefficiente de descarga, [adim]	0,608 47	0,0070 %	Normal, k=1,96	B	0,002 17	4,607930583	1,001E-02	1,0027E-04	50
2	Presión estática, [Pa]	400 000		normal		1 442,5	0,000004	5,255E-03	2,7617E-05	51
2a	Calibración		0,007	normal, k=1,96	B	1428,6	---	---	---	50
2b	variaciones		200,000	normal (k=1)	A	200	---	---	---	20
3	Presión diferencial, [Pa]	26 783		normal		121,1	0,000053	6,362E-03	4,0472E-05	39
3a	Calibración		0,00500	normal	B	68,3	---	---	---	50
3b	variaciones		100,000 00	normal (k=1)	A	100	---	---	---	20
4	Coefficiente de expansibilidad, [adim]	0,974 3	0,002 61	normal, k=1,96	B	0,0013	2,87775	3,831E-03	1,4679E-05	50
5	Densidad del fluido, [kg/m ³]	1,256 7	0,003 0	normal, k=1,96	B	0,0019	1,115536	2,146E-03	4,6043E-06	50
6	Temperatura, [K]	693		normal		2,25	-0,00187	-4,204E-03	1,7674E-05	30
6a	Calibración		2,0	normal, k=1,96	B	1,02	---	---	---	50
6b	Gradientes		2,0	normal, k=1	B	2	---	----	---	20
7	Diámetro placa a To, [m]	0,141 28	0,000 064	normal, k=1,96	B	3,26531E-05	66,39768	2,168E-03	4,7006E-06	¥
++++										
8	Diámetro tubería a To, [m]	0,202 210	5,00E-04	normal, k=1,96	B	2,55E-04	-19,14769	-4,885E-03	2,3859E-05	¥
9	Coefficiente de expansión placa, [1/K]	0,000 017	± 1,73E-6	uniforme	B	1,0E-06	3726,92262	3,723E-03	1,3857E-05	¥
10	Coefficiente de expansión tubería, [1/K]	0,000 012	± 1,73E-6	uniforme	B	1,0E-06	-1579,68795	-1,57782E-04	2,4895E-08	¥
11	Viscosidad dinámica	2,4E-05	0,000 000 24	normal, 1,96	B	1,2449E-07	1485,70665	1,84955E-04	3,4208E-08	¥
12	Exponente isentrópico	1,28700	1,00%	normal, 1,96	B	0,01287	0,05599	7,206E-04	5,1932E-07	¥
	Flujo másico, [kg/s]	2,803 79								
	Beta	0,699987						suma	0,0002 4	
	Diámetro, d	0,142241						raiz	0,016	
	Diámetro, D	0,203205						grados efectivos	169	
	Calc. Coef. Expans. [adim]	0,974298						factor t₉₅ (v=169)	2,01	
	Viscosidad dinámica, [Pa s]	0,000024						inc. Exp. [kg/s]	0,031	
	Velocidad, [m/s]	141,75								
	Reynolds	719999								

ANEXO B. RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES QUE DEFINEN AL MENSURANDO (VOLUMEN NETO DE HIDROCARBUO).

$$q_m = \frac{C_d \epsilon_1 \pi d_T^2}{4\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2\Delta P \rho_1}$$

- *variable intermedia*
- variable de entrada*
- mensurando*

