



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA MEDICIÓN DE CAUDAL VOLUMÉTRICO CON UN TUBO VENTURI, TANQUE VOLUMÉTRICO Y VERTEDERO EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE ESIME UNIDAD PROFESIONAL AZCAPOTZALCO

J. Santana Villarreal Reyes

*Instituto Politécnico Nacional ESIME Azcapotzalco
svillarreal@ipn.mx*

Juan José Martínez Cosgalla

*Instituto Politécnico Nacional ESIME Azcapotzalco
jmartinezc@ipn.mx*

Gerardo Irving Arjona Ramírez

*Instituto Politécnico Nacional ESIME Azcapotzalco
garjona@ipn.mx*

Resumen

En este trabajo se realizó el estudio experimental de la medición de flujo de fluidos a través de un tubo de Venturi, tanque volumétrico y vertedero triangular (conocido también como la medición de caudal volumétrico o simplemente medición de gasto volumétrico), en el laboratorio de hidráulica de ESIME Azcapotzalco, lo que se mide es la cantidad de fluido que circula o viaja a través de una tubería (sección transversal) por unidad de tiempo. Es de importancia conocer el flujo volumétrico en los procesos industriales, en la producción de vapor en centrales termoeléctricas, donde es necesario medir el flujo de agua condensada que alimenta al generador de vapor, en la industria alimenticia, petroquímica, el suministro de agua a casa habitación y en otras tantas aplicaciones. A través de las ecuaciones de energía, de continuidad, número de Reynolds, se determina la velocidad media en la garganta del Venturi y con los coeficientes de descarga se determina la cantidad de caudal volumétrico, este flujo se compara con el obtenido por tanque y vertedero.

Palabras clave: tubo Venturi, flujo volumétrico, pérdidas de energía, coeficiente de descarga, velocidad.

El estudio experimental de la medición del caudal volumétrico en líneas de tuberías de conducción y distribución de distintos líquidos en los diferentes procesos industriales es muy importante; por ejemplo, la cantidad de agua potable y gas suministrado a una casa habitación, el flujo de aire en los intercambiadores de calor, flujo de gasolina, y refrigerante en automóviles, flujo de aceite en los circuitos hidráulicos. El estudio experimental de la medición del gasto volumétrico en el laboratorio de hidráulica se realiza utilizando la teoría de flujo incompresible, la ecuación de balance de masa, la ecuación de la energía, la de continuidad, y la ecuación para determinar el caudal en vertederos triangulares de pared delgada. Con el apoyo de nomogramas se determina el coeficiente de caudal para el tubo Venturi en cada medición de caudal.

Dinámica de fluidos incompresibles

Las leyes que deben cumplir las tuberías en paralelo son:

Ecuación de continuidad. En hidráulica demuestra que el caudal que pasa por la sección uno (Q_1), pasa por la sección dos (Q_2), esto es debido a que la densidad absoluta (ρ) del fluido de trabajo es la misma en ambas secciones, la figura 1 es un volumen de control donde se analiza la entrada del fluido (punto 1) y salida (punto 2), el punto s es cualquier elemento diferencial de superficie en el tubo de control

Al estudiarse el movimiento de un fluido en un volumen de control como la figura 1, se analiza en tres puntos distintos de éste, el comportamiento del fluido en el tubo de control está dado por:

$$\iiint \rho v ds = 0 \quad (1)$$

donde:

ρ - densidad absoluta del fluido (kg/m^3)

v – vector velocidad (m/s)

ds – vector diferencial de superficie (m^2)

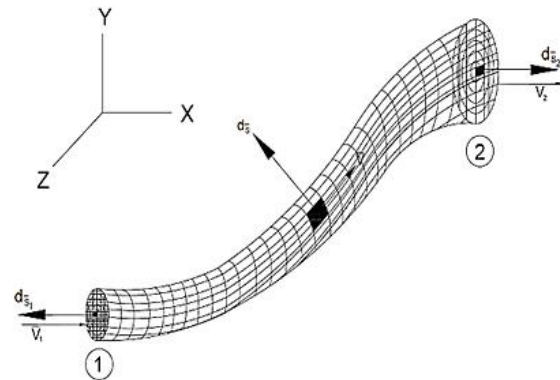


Figura 1. Tubo de control estudio analítico de flujo incompresible. Fuente: Propia J. S. Villarreal, J. J. Martínez & F. D. Sánchez

$$\int \rho_1 v_1 ds_1 + \int \rho_s v_s ds_s + \int \rho_2 v_2 ds_2 = 0 \quad (2)$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = cte \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \quad (3)$$

donde:

v_1, v_2 – velocidad media en las secciones

1 y 2 (m/s)

A_1, A_2 - sección transversal de la tubería en los puntos 1, 2 (m^2)

La ecuación 3 es la ecuación de continuidad para un fluido incompresible

Ecuación de Bernoulli generalizada, considerando que la partícula de fluido se mueve en un campo de flujo estacionario e irrotacional como lo muestra la figura 2, aplicando la segunda ley de Newton (la cual se menciona como la relación de conservación del momento lineal en la mecánica de fluidos) en la dirección de s , sobre la partícula de fluido en movimiento a lo largo de un filamento o hilo de corriente de que está constituido el tubo de control, esta figura ayuda a deducir la ecuación

de Bernoulli necesaria para realizar este trabajo, de esta figura se tiene:

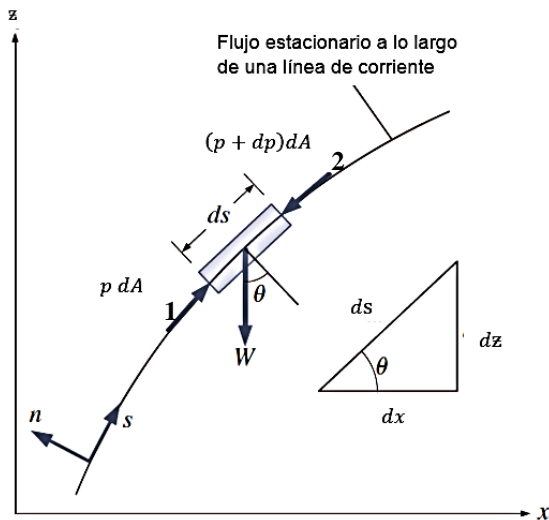


Figura 2. Fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido de masa "m" a lo largo de una línea de corriente.
Fuente: Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones Yunus A. Cengel, John M. Cimbala

$$\sum F_s = ma_s \quad (4)$$

$$p dA - (p + dp) dA - W \sin \theta = m v \frac{dv}{ds} \quad (5)$$

$$\int \left(\frac{dp}{\rho} + \frac{d(v^2)}{2} + g dz \right) = C \quad (6)$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (7)$$

donde:

$\frac{p_1}{\rho g}, \frac{p_2}{\rho g}$ – altura de presión en la sección 1 y 2 de la línea de corriente (m.c.l)

z_1, z_2 – altura geodésica en los puntos 1 y 2 (m)

H – altura de presión que da la bomba (m.c.l)

H_{r1-2} – pérdida de presión por rozamiento (m.c.l)

La ecuación 7 también se le conoce como la ecuación de la energía

Para determinar el régimen del flujo si es laminar o turbulento utilizamos la ecuación de Reynolds

$$R_e = \frac{Dxv}{\nu} \quad (8)$$

donde:

R_e – número de Reynolds (a adimensional)

ν – viscosidad cinemática (m²/s)

D – diámetro interno de la tubería (m)

v – velocidad media del fluido en la tubería (m/s)

Para determinar el coeficiente de caudal (C_q) del tubo Venturi, se hace uso de la figura 3 que es un nomograma obtenido en forma experimental para determinar el coeficiente de caudal del tubo de Venturi normalizado, este nomograma se encuentra en el apéndice 12 del libro Mecánica de fluidos y Máquinas hidráulicas de Claudio Matiax, segunda edición figura, con el número de Reynolds y la relación de áreas de toma de alta y baja presión se lee este coeficiente.

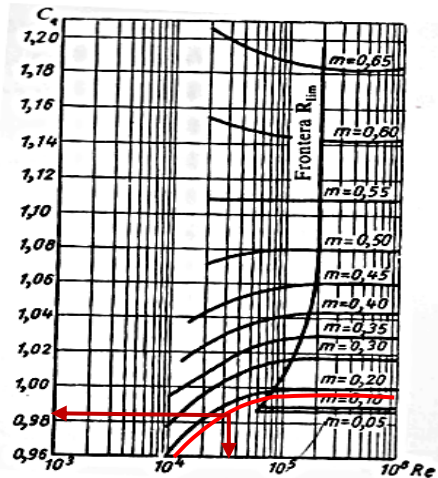


Figura 3. Nomograma para determinar el coeficiente de caudal del tubo de Venturi. Fuente: Libro mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. Matix C.

Caudal de un vertedero triangular.

La figura 4 es un vertedero de pared delgada triangular donde α es de 90° , para medición de flujos pequeños.

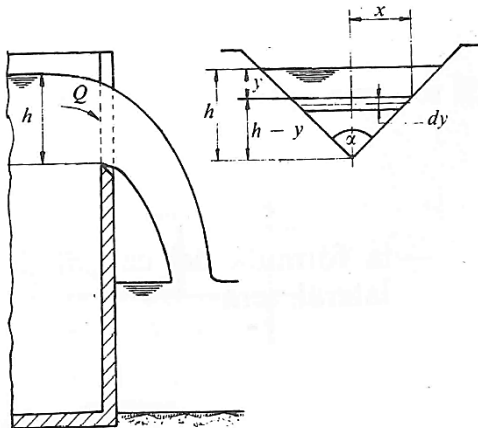


Figura 4. Vertedero de pared. Fuente: Libro mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. Matix C.

La ecuación que determina el flujo volumétrico para un vertedero triangular como el de la figura 3 y el que se encuentra instalado en el banco de pruebas de la ESIME Azcapotzalco es:

$$Q = c_q \frac{8}{15} \tan \frac{\alpha}{2} h^2 \sqrt{2gh} \quad (9)$$

Para determinar el caudal volumétrico con el tubo de Venturi se utiliza la ecuación de velocidad teoría en la garganta o sección minima de este tubo, aplicando la ecuación de Bernoulli del punto de toma de alta presión a toma de baja presión se llega a la siguiente ecuación.

$$v_{2t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\left[\left(\frac{p_1}{\rho g}\right) - \left(\frac{p_2}{\rho g}\right)\right] 2g} \quad (10)$$

Toma de lecturas del estudio experimental del banco de pruebas.

La figura 5 es el banco de pruebas del estudio experimental donde se observa el tubo de Venturi y el tanque volumétrico.



Figura 5. Banco de pruebas con el tubo de Venturi. Fuente: Propia, J. S. Villarreal, J. J. Martínez y I. Arjona.

La figura 6 es el vertedero de pared delgada que está instalado en el banco de pruebas y sirve para determinar el flujo volumétrico.



Figura 6. Banco de pruebas con el vertedero de pared delgada. Fuente: Propia, J. S. Villarreal, J. J. Martínez y I. Arjona.

Toma de datos de la prueba experimental.

La tabla 1 muestra los datos obtenidos al realizar el experimento de la medición de caudal volumétrico con el tubo de Venturi, tanque volumétrico y a través de vertedero de pared delgada.

Tabla 1. Datos obtenidos de la prueba experimental. Fuente: J. S. Villarreal, J.J. Martínez y I. Arjona.

N° de lecturas	posición de válvula	Lectura del Venturi h (pulg)	Lectura del Vertedero h (mm)	Lectura del tiempo t (s)	Volumen V(l)
1	Totalmente cerrada	0	0	0	0
2	¼ abierta	8	38	t ₁ =21.17 t ₂ =21.49 t ₃ =21.08 t ₄ =21.87	10
3	½ abierta	14	42	t ₁ =26.12 t ₂ =26.74 t ₃ =26.56 t ₄ =26.07	15
4	¾ abierta	18	44	t ₁ =31.84 t ₂ =31.18 t ₃ =31.86 t ₄ =31.42	20
5	Totalmente abierta	20	45.5	t ₁ =37.25 t ₂ =37.32 t ₃ =37.08 t ₄ =37.87	25

Determinando el promedio de los tiempos tomados de cada apertura de la válvula, se descartaron los tiempos que presentan discrepancia con el resto de los tiempos de cada lectura, convirtiendo los datos de la tabla 1 en Ejemplar 30. Enero-junio de 2024

unidades del sistema internacional se construye la tabla 2 con los datos requeridos para realizar la memoria de cálculo.

Tabla 1. Datos de la prueba en el sistema internacional de unidades. Fuente: J. S, Villarreal, J.J. Martínez y I. Arjona.

N° de lecturas	posición de válvula	Lectura del Venturi h (m.c.a)	Lectura del Vertedero h (m)	Tiempo promedio t (s)	Volumen V(l)
1	Totalmente cerrada	0	0	0	0
2	¼ abierta	0.2032	0.038	21.4025	10
3	½ abierta	0.3556	0.042	26.3725	15
4	¾ abierta	0.4572	0.044	31.5875	20
5	Totalmente abierta	0.508	0.0455	37.38	25

Determinación del caudal con tanque volumétrico, tubo de Venturi y vertedero triangular.

Lectura 1

Caudal con tubo Venturi $Q = 0$
 Caudal con tanque volumétrico $Q = 0$
 Caudal con vertedero $Q = 0$

Lectura 2. ¼ de válvula abierta

Caudal por tanque volumétrico

$$Q = \frac{(10)}{21.4025} = 0.4672 \frac{l}{s} = 4.672 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Caudal por lectura del Venturi:

$$D_1 = 0.038 \text{ m}; A_1 = \frac{\pi \cdot (0.038 \text{ m})^2}{4} = 1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_2 = 0.0158 \text{ m}; A_2 = \frac{\pi \cdot (0.0158 \text{ m})^2}{4} = 1.98 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Utilizando la ecuación 10

$$v_{2t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\left[\left(\frac{p_1}{\rho g}\right) - \left(\frac{p_2}{\rho g}\right)\right] 2g}$$



$$v_{2t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1.98 \times 10^{-4}}{1.14 \times 10^{-3}}\right)^2}} \sqrt{2(9.81)(0.203)}$$

$$v_{2t} = 2.025 \frac{m}{s}; Q_{2t} = v_{2t} * A_2$$

$$Q_{2t} = (2.025)(1.98 \times 10^{-4}) \\ = 3.99 \times 10^{-4} m^3/s$$

$$v_2 = v_{2t} * Cv = (2.025 m/s)(0.98) \\ = 1.98 m/s$$

$$Q_2 = v_2 * A_2$$

$$Q_2 = (1.98)(1.98 \times 10^{-4}) \\ = 3.9204 \times 10^{-4} m^3/s$$

Determinado el coeficiente de caudal (c_q)

$$Re = \frac{v_{2t} * D_2}{\nu @ 20^\circ} = \frac{(2.02) * (0.015875)}{(1.02 \times 10^{-6} m^2/s)} \\ = 3.14 \times 10^4 ad$$

$$m = \frac{A_2}{A_1} = \frac{(1.98 \times 10^{-4} m^2)}{(1.14 \times 10^{-3} m^2)} = 0.17$$

De la figura 3 con el número de Reynolds y el valor de m de se determina el C_q , para este caso es de 0.983, con este coeficiente se calcula el caudal volumétrico real que pasa por la garganta del tubo Venturi.

$$Q_2 = (0.983)(1.98 \times 10^{-4} m^2) \sqrt{2(9.81)(0.203)} \\ Q_2 = 3.884 \times 10^{-4} m^3/s$$

Caudal determinado por el vertedero

$$Q_2 = (0.593) \frac{8}{15} * \sqrt{2(9.81)} * \tan^{-1} \frac{90^\circ}{2} \\ * (0.038 m)^{\frac{5}{2}}$$

$$Q_2 = 3.943 \times 10^{-4} m^3/s$$

Ejemplar 30. Enero-junio de 2024

El coeficiente de caudal de la ecuación 9, para vertederos triangulares de pared delgada con aristas vivas y cuyo ángulo sea de 90° , se toma de 0.593 dato obtenido en forma experimental.

Siguiendo este mismo algoritmo para los puntos 3, 4 y 5, se construye la tabla número 3, esta tabla es el resultado de la memoria de cálculo del flujo volumétrico con tubo de Venturi, vertedero y tanque volumétrico.

Tabla 3. Resultado del caudal volumétrico medido con tubo Venturi, tanque volumétrico y vertedero. Fuente: J. S, Villarreal, J.J. Martínez y I. Arjona.

N° de lecturas	Caudal con tubo Venturi $Q \left(\frac{m^3}{s}\right)$	Caudal con vertedero $Q \left(\frac{m^3}{s}\right)$	Caudal con tanque volumétrico $Q \left(\frac{m^3}{s}\right)$
1	0	0	0
2	3.884×10^{-4}	3.943×10^{-4}	4.672×10^{-4}
3	5.162×10^{-4}	5.064×10^{-4}	5.687×10^{-4}
4	5.859×10^{-4}	5.688×10^{-4}	6.331×10^{-4}
5	6.182×10^{-4}	6.207×10^{-4}	6.688×10^{-4}

Graficando los valores obtenidos de la memoria de cálculo, valores que se muestran en la tabla 3, para los instrumentos utilizados en el laboratorio de pruebas, la figura 7 sale de graficar la tabla tres, en esta grafica se puede observar el perfil de la curva que sigue la medición de caudal volumétrico con el tubo de Venturi, la curva de medición con tanque volumétrico, tomando un volumen en cierto tiempo (se tomaron 4 tiempos y se determinó el tiempo promedio), así como la medición de flujo con un vertedero de pared delgada utilizando un coeficiente de descarga preestablecido por norma.

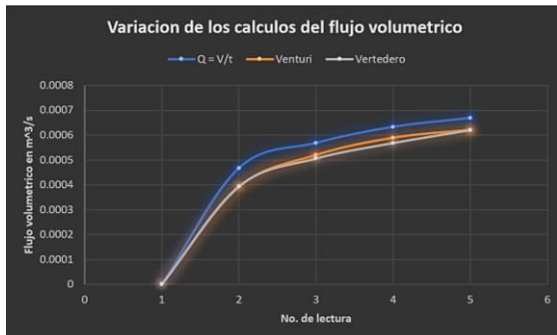


Figura 7. Curvas de flujo volumétrico con tubo Venturi, tanque volumétrico y vertedero. Fuente: Propia, J. S. Villarreal, J. J. Martínez y I. Arjona.

Conclusión

En este trabajo se presenta resultado del estudio experimental de la medición del caudal volumétrico de agua a 20°C, con un tubo Venturi, tanque volumétrico y vertedero de pared delgada triangular de 90° en el laboratorio de hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y eléctrica unidad profesional Azcapotzalco, teniendo resultados muy cercanos entre sí, en la medición con tanque volumétrico se debe tener mucho cuidado con la lectura del tiempo en que se va llenando el tanque, de otra forma la lectura será errónea, la figura 7 muestra la comparación de las curvas obtenidas con los tres distintos instrumentos de medición habiendo un intervalo del 2% de variación entre un instrumento a otro, la medición de flujo con tubo de Venturi, tanque volumétrico y vertedero, es muy confiable, solo hay que tener cuidado con las tomas de lecturas del manómetro diferencial, intervalo del tiempo transcurrido por cada lectura, y la lectura de la

lámina de agua en el vertedero de pared delgada.

Referencias

- Becerril, L. D. (2002). *Instalaciones Eléctricas Prácticas*. <https://profefily.com/wp-content/uploads/2017/12/Instalaciones-El%C3%A9ctricas-Pr%C3%A1cticas-Becerril.pdf>
- Crane, México (1998). *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. [https://www.academia.edu/7436924/1_Flujo de Fluidos en valvulas Accesorios y Tuberias_Crane_Mc_Graw_Hill](https://www.academia.edu/7436924/1_Flujo_de_Fluidos_en_valvulas_Accesorios_y_Tuberias_Crane_Mc_Graw_Hill)
- Forsthoffer, W. E. (2005). *Pumps: Forsthoffer's Rotating Equipment Handbooks*. USA: Elsevier Science & Technology Books
- Karasik, I. J. and Carter, R. (1983). *Bombas Centrifugas, Selección, Operación y Mantenimiento*. Compañía Editorial Continental.
- Mataix, C. (2011). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. México: Alfaomega, Oxford.
- McCabe, W. L. Smith, J. C. and Harriott, P. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. España. McGraw-Hill.
- Viejo, M. y Álvarez, J. (2003). *Bombas, teoría, diseño y selección*. México: Limusa, S.A de C.