

Modelación Numérica Tridimensional del Medidor de Caudal Palmer-Bowlus Aplicando el Programa FLOW-3D

Toapaxi-Alvarez, Jorge^{1,*} ; Silva-Bastidas, Roberto¹ ; Torres-Jacobowitz, Cristina¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

Resumen: El medidor de caudal Palmer-Bowlus fue desarrollado en 1936, como una adaptación del medidor Venturi para uso en alcantarillado, debido a la dificultad en la modificación de la solera de la tubería. Existen medidores Palmer-Bowlus a la venta en el sector comercial de un solo cuerpo con su respectiva curva de descarga, cuya adquisición incrementa el costo de los proyectos de alcantarillado. Con base en el modelo físico del medidor Palmer-Bowlus (Torres & Vásquez, 2010), esta investigación tuvo como objetivo realizar la modelación numérica tridimensional de estos medidores, considerando cuatro diámetros de tubería: 160 mm, 200 mm, 250 mm y 400 mm; los diámetros seleccionados son los de mayor uso, de acuerdo con la información provista por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). Las curvas de descarga fueron calibradas y validadas mediante el programa FLOW-3D. El mallado tuvo gran influencia en la calidad de los resultados y en la duración de la simulación numérica; al contrario, la rugosidad y los modelos de turbulencia (RNG y k-e) tuvieron poca influencia. Las curvas de descarga obtenidas en la modelación numérica tienen buena aproximación a las obtenidas en el modelo físico.

Palabras clave: Alcantarillado, Palmer-Bowlus, medidor de caudal, CFD, FLOW-3D.

Three-Dimensional Numerical Modeling of the Palmer-Bowlus Measuring Flume Applying the FLOW-3D Software

Abstract: The Palmer-Bowlus flume was developed in 1936, as an adaptation of the Venturi flume for the use in sewer systems, due to the difficulty in modifying the pipe invert. There are commercially available single-body Palmer-Bowlus flume with their respective discharge curves, which increase the cost of sewer projects. Based on the physical model of the Palmer-Bowlus flume (Torres & Vásquez, 2010), the aim of this research was to carry out the three-dimensional numerical modeling of these flow meters, considering four pipe diameters: 160 mm, 200 mm, 250 mm and 400 mm; the selected diameters are the most used ones, according to the information provided by the Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). The discharge curves were calibrated and validated using the FLOW-3D program. Meshing had a great influence on the quality results and duration of the numerical simulation; in contrast, the roughness and turbulence models (RNG y k-e) had little influence. The discharge curves obtained in the numerical modeling have good approximation to those obtained in the physical model.

Keywords: Sewer, Palmer-Bowlus, flow meter, CFD, FLOW-3D.

1. INTRODUCCIÓN

El medidor Palmer-Bowlus fue desarrollado en 1936 y es una adaptación del medidor Venturi para uso en alcantarillado, la diferencia entre éste y el medidor Venturi es que el medidor Palmer-Bowlus no requiere de la caída en el perfil longitudinal, por lo que puede ser instalado en alcantarillados existentes donde se dificulte la modificación de sus soleras (Ludwig & Ludwig, 1951). En el trabajo mencionando anteriormente se presenta el procedimiento para el cálculo de este tipo de medidores, que consta de tres partes:

- Selección de la forma del medidor y sus proporciones.
- Obtención de los puntos caudal (Q) vs calado (H_o).
- Creación de la curva de descarga.

En el primer paso, se determina las dimensiones fundamentales del medidor, tomando en cuenta los factores que controlan el diseño, que en general son: el calado y la velocidad del flujo.

En el segundo paso, para la obtención de los puntos Q vs H_o se utiliza un método de prueba y error simplificado, empleando una ayuda gráfica.

*jorge.toapaxi@epn.edu.ec
Recibido: 20/08/2019
Aceptado: 04/01/2022
Publicado: 01/02/2022
10.33333/rp.vol49n1.04
CC 4.0

En el paso final, la creación de la curva de descarga resulta de obtener de los puntos descritos en el paso anterior, mediante la técnica semigráfica simple, que consiste en ir graficando los puntos Q vs H_0 de cada evento, hasta obtener suficientes puntos para realizar el trazado de la curva y la obtención de la ecuación característica.

El paquete informático FLOW-3D v11.2 es un programa de propósito general de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por las siglas de *Computational Fluid Dynamics*). El programa emplea técnicas numéricas especializadas para resolver las ecuaciones de movimiento de fluidos, que permite obtener: transientes, soluciones en tres dimensiones que presentan gran variación de los parámetros en el espacio o tiempo (multi-escala) y problemas de flujo multi-físicos (Flow Science, Inc., 2016).

En el estudio de Torres & Vásquez (2010), se construyó un medidor Palmer-Bowlus de 33 cm de diámetro y se obtuvo la curva de descarga experimental, para caudales entre 3.7 l/s y 40.18 l/s. Con ese antecedente, en el presente análisis se estableció las curvas de descarga del medidor Palmer-Bowlus, mediante la modelación CFD para cuatro diámetros de tuberías comerciales (160 mm, 200 mm, 250 mm y 400 mm). Para lo cual, se calibró el modelo numérico con la curva de descarga experimental del medidor de 33 cm de diámetro. Una vez calibrado y validado el modelo, se realizó las modelaciones de los cuatro diámetros de tuberías comerciales para obtener las curvas de descarga, que pueden ser fácilmente utilizadas en la práctica diaria.

En este sentido, se planteó los siguientes objetivos específicos:

- Construir y calibrar el modelo tridimensional, utilizando el programa FLOW-3D, en función del modelo físico realizado por Torres & Vásquez (2010).
- Analizar mediante un estudio de sensibilidad de parámetros: el tiempo de modelación, el tipo de modelo de turbulencia, el tamaño del mallado y la rugosidad.
- Obtener las curvas de descarga para los cuatro medidores Palmer-Bowlus, considerando tuberías de diámetro iguales a: 16 cm, 20 cm, 25 cm y 40 cm.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Medidores de Caudales

Según Chow (2004), en una sección crítica de control la relación entre la profundidad y el caudal es única, no depende de la rugosidad del canal, ni de otras circunstancias no controlables; es decir, la relación profundidad respecto al caudal es la base teórica para la medición en canales abiertos.

A lo largo de los años, se han desarrollado varias estructuras para la medición del flujo, donde se obtiene la profundidad crítica con la ayuda de la construcción de una elevación en la solera del canal, generalmente pequeña. En este campo se distinguen los vertederos por ser de fácil construcción, sin embargo, generan pérdidas considerables. Los vertederos pueden ser de varias formas, definidos por el perímetro mojado

y su forma, tales como: vertederos rectangulares, trapeziales, triangulares, de pared delgada, de pared gruesa, de forma redondeada, entre otros (Domínguez, 1999).

Otra desventaja de los vertederos es que, al cerrar completamente el canal, producen un embalsamiento aguas arriba de la estructura; si a esto le sumamos la presencia de partículas, estas se depositan en el embalse cambiando paulatinamente el coeficiente de descarga.

Para solventar este problema, al menos parcialmente, se popularizó el uso de medidores de flujo crítico (Chow, 2004), conocido como medidor tipo Venturi. Este usualmente opera en condición no sumergida, con la profundidad crítica en la sección contraída y un resalto hidráulico en la sección de salida.

Otra estructura ampliamente utilizada es el medidor tipo Parshall, el cual, debido a su contracción, aumenta la velocidad del flujo, lo que imposibilita que las partículas se sedimenten; es decir, cualquier partícula de arena o de limo puede ser arrastrada fuera de su estructura. Sin embargo, si existe una carga considerable de materiales, el medidor padecerá de los mismos inconvenientes que los vertederos, debido a la sedimentación sus resultados no serán confiables. Para solventar este problema se desarrolló el medidor San Dimas, que tiene un mecanismo auto limpiante para flujos altamente cargados de materiales, no obstante, esta estructura tiene algunas desventajas: no puede usarse combinada con una compuerta aguas arriba, su geometría encarece su construcción y requiere de una mano de obra más especializada que otros medidores (vertederos).

Con esos antecedentes, con base en el medidor Venturi se originó el medidor Palmer-Bowlus (1936), que se diferencia por no disponer de la caída en el perfil longitudinal, lo cual representa una ventaja en su adaptación a redes existentes. Sin embargo, el medidor Palmer-Bowlus desarrollado por Ludwig & Ludwig (1951) tiene una geometría predeterminada, que de ser modificada, imposibilita el uso de sus ecuaciones.

Torres & Vásquez (2010) partieron del mismo enfoque que Ludwig & Ludwig (1951) y definieron las ecuaciones para el cálculo del caudal tomando en cuenta el cambio de la geometría, con lo cual se obtuvo los caudales para distintos tipos del medidor Palmer-Bowlus. La ecuación obtenida en ese estudio, que está basada en el análisis dimensional, para cualquier medidor Palmer – Bowlus es la siguiente:

$$Q = H_0^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}} f_1 \left(\frac{D}{H_0} \right) \quad (1)$$

Donde:

h_0 es el calado en la zona de medición (m); g es la gravedad igual a $9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right)$; $f_1 \left(\frac{D}{H_0} \right)$ representa al coeficiente de descarga; D es el diámetro de la tubería.

Así mismo, como resultado de ese estudio se obtuvo una ecuación para cualquier medidor Palmer-Bowlus con un rango de caudales entre 0 (l/s) y 2223 (l/s):

$$\frac{Q}{H_0^{\frac{5}{2}}g^{\frac{1}{2}}} = -0.0358 \left(\frac{D}{H_0}\right) + 0.4743 \quad (2)$$

El esquema de un medidor Palmer-Bowlus con sus dimensiones características se muestra en la Figura 1.

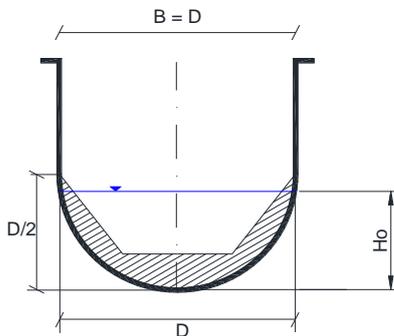


Figura 1. Parámetros del medidor Palmer-Bowlus

2.2 Modelación Hidráulica (CFD)

Las técnicas numéricas en ingeniería han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas, siendo concretamente la Mecánica de Fluidos una de las disciplinas científicas donde este auge ha tenido mayor repercusión (Fernández, 2012). El campo de la hidráulica ya ha incursionado en las simulaciones CFD, como una herramienta complementaria de los laboratorios, en donde los fenómenos son representados a escala con un costo elevado. El análisis CFD ayuda a la toma de decisiones, y en gran medida a la reducción de costos en etapas de diseño y verificación (Aulestia, 2017).

El costo de un experimento, en términos del alquiler del laboratorio y/o salarios, es proporcional al número de puntos de datos y al número de configuraciones a ensayar en un modelo físico; a diferencia de la modelación CFD, que puede generar volúmenes extremadamente grandes de resultados a un costo aproximadamente igual, además de la realización de estudios de rendimiento paramétrico, entendidos como, el análisis del impacto de los diferentes parámetros, en el resultado y tiempo de la modelación (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Por lo tanto, la optimización de las estructuras hidráulicas debe ser tal que, no solo los resultados obtenidos sean confiables, sino también, que los tiempos de modelación sean razonables. En el campo de la dinámica de fluidos computacional, ha existido un gran avance en la resolución de las ecuaciones que gobiernan a los fluidos, mediante el uso de modelos numéricos que pueden, con cierto grado de aproximación, entregar resultados confiables del funcionamiento hidráulico de estructuras complejas (Aulestia, 2017). En la actualidad, en el estudio de los problemas hidráulicos se aplica la modelación CFD, con base en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes.

2.3 Modelo FLOW-3D

A pesar que en el siglo XX las técnicas numéricas podían aproximarse a la solución de las ecuaciones complejas de Navier – Stokes, los ordenadores tenían poca capacidad hasta mediados de ese siglo. Sin embargo, en ese periodo debido al

avance en el procesamiento computacional, se impulsó las técnicas CFD. Así, en 1985 se constituyó el laboratorio nacional de los Álamos (LANL) y la comercialización del programa FLOW-3D para la modelación de flujos a superficie libre.

El programa resuelve las ecuaciones promediadas de Reynolds – Navier Stokes (RANS), al igual que los algoritmos FAVOR y VOF, para el contorno sólido y el seguimiento de la superficie libre, respectivamente. Para alcanzar la solución, este programa emplea el método de diferencias finitas. La presión está integrada en la ecuación de cantidad de movimiento y la velocidad está presente en la ecuación de continuidad; las cuales se solucionan a partir de un proceso iterativo. Para el efecto, el programa cuenta con tres fases principales:

- a) Pre proceso: Ingreso de datos, principios físicos.
- b) Proceso o solucionador: modelo matemático, solución numérica.
- c) Post proceso: resultados (figuras, tablas).

2.4 Ecuaciones de Movimiento del Fluido

El programa FLOW-3D tiene como base de solución las siguientes ecuaciones:

2.4.1. Ecuación de Continuidad

La ecuación general de continuidad de masa se describe a continuación:

$$V_F \frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x}(\rho u A_x) + R \frac{\delta}{\delta y}(\rho v A_y) + \frac{\delta}{\delta z}(\rho \omega A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (3)$$

Donde:

V_F es la fracción de volumen abierto para flujo; ρ es la densidad del fluido; R_{DIF} término de la difusión turbulenta; R_{SOR} fuente de masa.

Al usar el sistema de coordenadas cartesianas los términos $R = 1$, $\xi = 0$.

Los componentes de velocidad u, v, w se encuentran en la dirección de las coordenadas x, y, z . La fracción de área abierta para el flujo en la dirección x, y, z se representa mediante A_x, A_y, A_z .

2.4.2. Ecuación de Cantidad de Movimiento

Las ecuaciones de Navier – Stokes para las componentes de velocidad en las tres direcciones (u, v, w), se presentan a continuación:

$$\frac{\delta u}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta u}{\delta x} + v A_y \frac{\delta u}{\delta y} + w A_z \frac{\delta u}{\delta z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} + G_x + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - \delta u_s) \quad (4)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta v}{\delta x} + v A_y \frac{\delta v}{\delta y} + w A_z \frac{\delta v}{\delta z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta y} + G_y + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - \delta v_s) \quad (5)$$

$$\frac{\delta w}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta w}{\delta x} + v A_y \frac{\delta w}{\delta y} + w A_z \frac{\delta w}{\delta z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \rho}{\delta z} + G_z + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - \delta w_s) \quad (6)$$

Donde:

G_x, G_y, G_z son las aceleraciones del cuerpo; f_x, f_y, f_z son las aceleraciones viscosas; $u_s, v_s, w_s = U_s$ es la velocidad del fluido en la superficie del medio, con respecto al mismo medio y es calculado para cada volumen de control, de la siguiente forma:

$$U_s = \frac{dQ}{\rho_Q dA} n \quad (7)$$

Donde:

dQ equivale al caudal másico; ρ_Q densidad del medio fluido; dA es el área de la superficie del medio en la celda; n es la normal exterior a la superficie.

2.5 Modelos de Turbulencia

Los modelos de turbulencia fueron concebidos para resolver el problema de cierre que tienen las ecuaciones de Reynolds al utilizar los valores medios, añadiendo el término de tensiones turbulentas, que supone añadir más variables al sistema original de ecuaciones (Recasens, 2014). Como consecuencia, los programas CFD como el FLOW-3D, tienen como finalidad la determinación del valor de la viscosidad turbulenta.

La turbulencia se expresa como un movimiento caótico y no estable de los fluidos, que ocurre cuando no existen suficientes fuerzas viscosas estabilizadoras.

$$k_T = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (8)$$

Donde las componentes u', v', w' son las componentes de la velocidad del fluido asociado con las fluctuaciones turbulentas caóticas.

$$\frac{\delta k_T}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta k_T}{\delta x} + v A_y \frac{\delta k_T}{\delta y} + w A_z \frac{\delta k_T}{\delta z} \right\} = P_T + Diff_{k_T} - \varepsilon_T \quad (9)$$

En la actualidad, se utiliza un modelo más sofisticado, que consiste en el uso de dos ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta k_t y su disipación ε_T , este modelo lleva el nombre de modelo $k - \varepsilon$.

$$\frac{\delta \varepsilon_T}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta x} + v A_y \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta y} + w A_z \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta z} \right\} = \frac{1.44 \varepsilon_T}{k_T} (P_T) + Diff_{\varepsilon} - 1.92 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (10)$$

El término difusión de la disipación se expresa como:

$$Diff_{\varepsilon} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\delta}{\delta x} \left(v_{\varepsilon} A_x \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(v_{\varepsilon} A_y \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(v_{\varepsilon} A_z \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta z} \right) \right\} \quad (11)$$

Otro modelo de turbulencia es el basado en el método del grupo de renormalización (RNG), este acercamiento aplica métodos estadísticos para la derivación del promedio de las ecuaciones. El modelo RNG usa ecuaciones similares a las del modelo $k - \varepsilon$, sin embargo, las constantes encontradas empíricamente para el modelo $k - \varepsilon$, son derivadas explícitamente en el modelo RNG (Flow Science, Inc., 2016). En general, el modelo describe de mejor manera los flujos con intensidad turbulenta baja. Las constantes del modelo son 1.42 en lugar de 1.44; y la segunda constante se calcula de la energía cinética turbulenta (k_T) y la producción turbulenta (P_T).

3. METODOLOGÍA

Para obtener las curvas de descarga de los medidores Palmer-Bowlus, se calibró el modelo tridimensional utilizando los datos obtenidos de la modelación física del medidor Palmer-Bowlus D=33 cm ($Q=22.047$ l/s). Calibrado el modelo, se validó la configuración con los once ensayos restantes reportados en la modelación física.

Una vez establecido el procedimiento, se obtuvo las curvas de descarga de los medidores Palmer-Bowlus para diferentes diámetros.

Para realizar las corridas se utilizó un Computador AMD RYZEN 7 1700 (16 núcleos trabajando a 3.9 Ghz todo el tiempo), 32 Gb de RAM con una velocidad de 3000 Mhz y un disco duro de capacidad igual a 2 TB para poder almacenar los archivos de resultados. Para la creación del modelo geométrico se utilizó el programa CATIA V5 y para la realización de la modelación numérica se aplicó el programa FLOW-3D.

En la Figura 2, se presenta el diagrama de flujo de la metodología empleada en la modelación tridimensional del medidor Palmer-Bowlus.

4. CALIBRACIÓN Y SENSIBILIDAD

Para calibrar el modelo se trabajó con el ensayo N.7, que tiene un caudal de $22.047 \left(\frac{l}{s}\right)$. Se escoge este caudal para realizar la calibración, debido a que se acerca al promedio igual a $20.634 \left(\frac{l}{s}\right)$; al igual que, si consideramos solo los valores extremos, con los ensayos N.1 y N.12, $\frac{Q_{min}+Q_{max}}{2} = 21.931 \left(\frac{l}{s}\right)$.

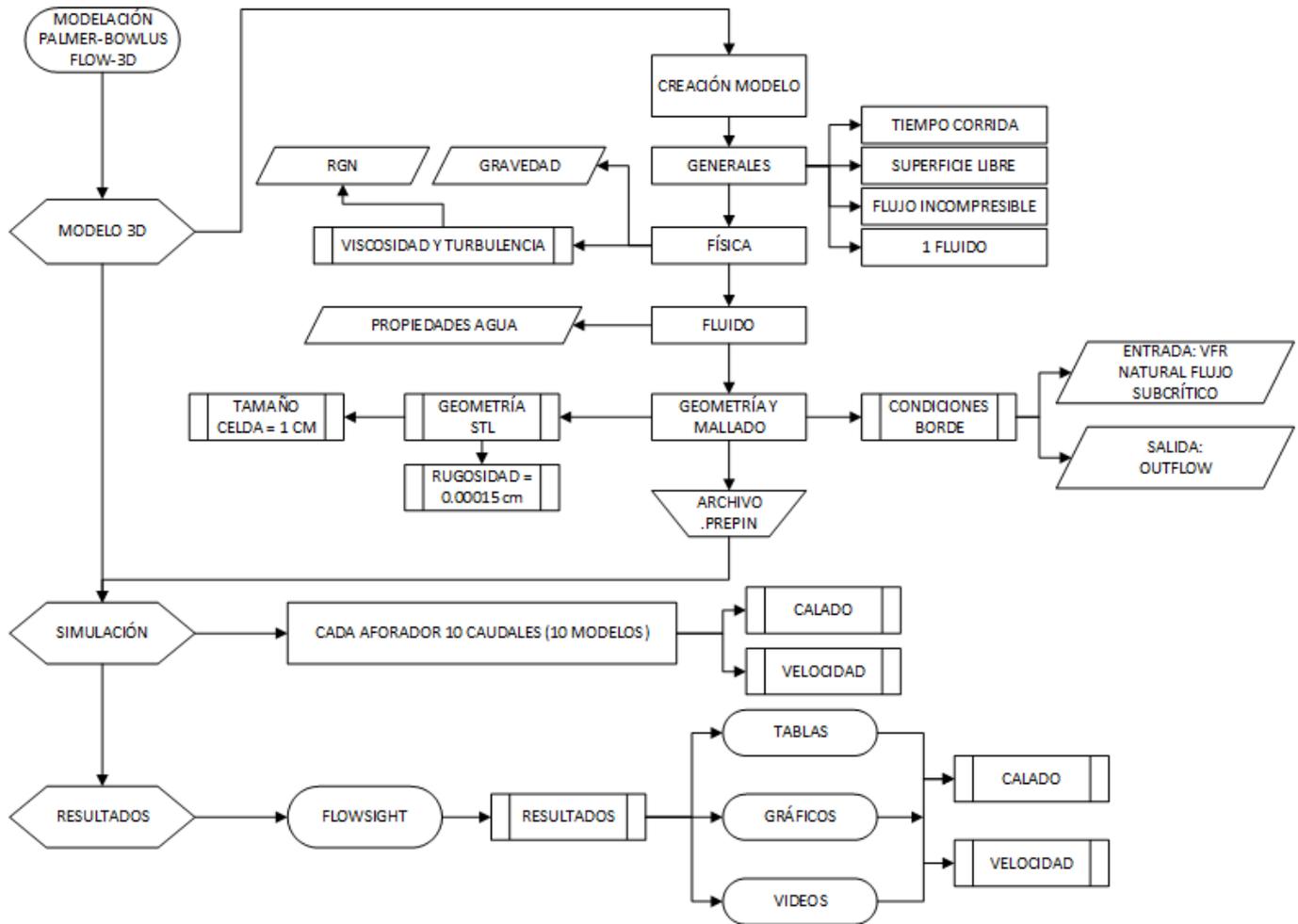


Figura 2. Diagrama de flujo de la modelación del medidor Palmer-Bowlus en FLOW-3D

Las condiciones de borde utilizadas en el modelo fueron las siguientes:

- En X (Dirección del flujo): mínimo (Vfr, “Q”), entrada libre; máximo (salida, “O”)
- En Y (Dirección transversal): mínimo (sólido, “S”); máximo (sólido, “S”)
- En Z (Dirección de la gravedad): mínimo (sólido, “S”); máximo (presión, “P”), fracción de fluido igual a cero

Se analizó la sensibilidad del modelo tomando en cuenta los diferentes tamaños de malla (0.5 cm, 1.0 cm, 1.5 cm y 2.0 cm). Al considerar una malla superior a 1.0 cm, la geometría del medidor no era representada adecuadamente.

Por lo que se descartaron tamaños superiores a 1.0 cm y se analizó la influencia del tamaño de malla en función de los resultados de calado y tiempo de ejecución del modelo; determinando que es adecuado y óptimo realizar el modelo con un tamaño de celda de 1 cm ($H_o = 20.098$ cm, $T = 1$ h), en vez del modelo con 0.5 cm de tamaño de celda ($H_o = 20.038$ cm, $T = 14$ h).

El tiempo total de modelación fue estudiado en un escenario conformando por 1’109.662,00 elementos (celda de 1 cm),

con el que se determinó el tiempo de modelación óptimo en 30 segundos, Tabla 1.

Tabla 1. Incidencia del tiempo de modelación

Tiempo (s)	Ho (cm)		Variación (%)
	M. Numérico	M. Físico	
22.90	20.036	19.627	2.084
30.00	20.038	19.627	2.094
30.90	20.038	19.627	2.094
34.90	20.038	19.627	2.094
39.00	20.038	19.627	2.094

Con base en el ensayo N.7, en la Figura 3 se muestra el perfil longitudinal del modelo numérico calibrado.

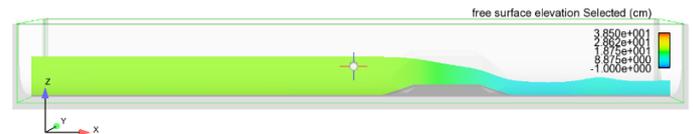


Figura 3. Captura de pantalla del modelo numérico $Q=22.047$ ($\frac{l}{s}$), $H_o=20.038$ cm

Referente al análisis de sensibilidad, para el escenario con $Q = 22.047$ l/s, se examinó los distintos modelos de turbulencia que contiene el programa; encontrando que, el

modelo RNG ($H_o = 20.038$ cm) y k-e ($H_o = 20.032$ cm) tienen resultados muy próximos. En el caso más crítico la diferencia entre sí es de 0.16 %; por lo tanto, se escogió el modelo RNG, recomendado en estudios similares (Casa, 2016).

Continuando con el análisis de sensibilidad, se estudió la rugosidad absoluta y su influencia en el modelo, determinando que esta variable no ejerce mayor influencia en la modelación. En consecuencia, se utilizó la rugosidad de 0.0015 mm, recomendada en la bibliografía (Sotelo, 1997).

5. VALIDACIÓN

El proceso de validación tiene como objetivo verificar la adecuada representación del fenómeno considerando un rango de caudales. Al respecto, se comparó los resultados obtenidos en el modelo numérico con los once resultados procedentes del modelo físico y se comparó los resultados de los dos métodos, Tabla 2. En el modelo numérico se consideró: Un medidor con $D = 33$ cm, un tamaño de malla de 1 cm, modelo de turbulencia RNG, rugosidad 0.00015 cm y un tiempo de corrida de 30 s.

Tabla 2. Comparación de calados en el medidor Palmer-Bowlus $D=33$ cm, para varios caudales

Ensayo	Q (l/s)	H _o (cm)		Error relativo (%)
		M. Físico	M. Numérico	
1	3.68	10.10	10.64	5.38
2	6.05	12.15	12.55	3.32
3	9.36	14.28	14.52	1.68
4	12.71	16.00	16.25	1.58
5	15.78	17.34	17.64	1.77
6	18.66	18.45	18.81	1.92
7	22.05	19.63	20.04	2.09
8	27.74	21.38	21.84	2.18
9	30.00	22.01	22.48	2.13
10	36.58	23.69	24.16	2.00
11	40.18	24.53	25.00	1.92
Promedio			2.37	

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las modelaciones realizadas para los medidores Palmer-Bowlus, con diámetros iguales a: 16 cm, 20 cm, 25 cm y 40 cm, se presentan a continuación:

6.1 Medidor Palmer-Bowlus $D = 16$ cm

La comparación de los calados obtenidos mediante el análisis dimensional y la modelación numérica, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación de calados en el medidor Palmer-Bowlus $D=16$ cm, para varios caudales

Ensayo	Q (l/s)	H _o (cm)		Error relativo (%)
		Análisis Dimensional	M. Numérico	
1	1.00	5.90	6.03	2.19
2	2.00	7.61	7.70	1.05
3	4.00	9.88	10.00	1.19
4	6.00	11.53	11.63	0.92
5	8.00	12.87	12.93	0.50
6	10.00	14.02	14.07	0.34
7	12.00	15.05	15.11	0.43
8	14.00	15.97	16.07	0.60
9	16.00	16.82	17.04	1.31
10	18.00	17.61	17.83	1.28
11	20.00	18.34	18.64	1.60
Promedio			1.04	

Los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la Ec. 2 tienen excelente aproximación, la diferencia promedio entre ambos es de 1.04 %. Para caudales bajos menores a 1.0 l/s, la diferencia se aproxima a 2.5 %.

6.2 Medidor Palmer-Bowlus $D = 20$ cm

La comparación de los calados obtenidos mediante el análisis dimensional y la modelación numérica, se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de calados en el medidor Palmer-Bowlus $D=20$ cm, para varios caudales

Ensayo	Q (l/s)	H _o (cm)		Error relativo (%)
		Análisis Dimensional	M. Numérico	
1	1.00	6.04	6.34	4.84
2	2.00	7.75	7.90	1.87
3	4.00	10.01	10.14	1.31
4	6.00	11.66	11.83	1.48
5	8.00	13.00	13.19	1.48
6	10.00	14.15	14.33	1.27
7	12.00	15.17	15.32	0.98
8	14.00	16.10	16.24	0.87
9	16.00	16.95	17.05	0.61
10	18.00	17.73	17.83	0.55
11	20.00	18.47	18.59	0.63
12	22.00	19.16	19.29	0.68
13	24.00	19.82	19.97	0.74
Promedio			1.33	

Los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la Ec. (2) tienen excelente aproximación, la diferencia promedio entre ambos es de 1.33 %. Para caudales bajos menores a 2.0 l/s la diferencia aumenta hasta 2.5 %.

6.3 Medidor Palmer-Bowlus $D = 25$ cm

La comparación de los calados obtenidos mediante el análisis dimensional y la modelación numérica, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparación de calados en el medidor Palmer-Bowlus D=25 cm, para varios caudales

Ensayo	Q (l/s)	Ho (cm)		Error relativo (%)
		Análisis Dimensional	M. Numérico	
1	1.00	6.22	6.89	10.72
2	2.00	7.92	8.30	4.72
3	4.00	10.18	10.40	2.13
4	6.00	11.82	12.04	1.84
5	8.00	13.16	13.42	1.91
6	10.00	14.32	14.60	2.00
7	12.00	15.34	15.65	2.04
8	14.00	16.26	16.58	1.96
9	16.00	17.11	17.41	1.79
10	18.00	17.89	18.17	1.56
11	20.00	18.63	18.89	1.41
12	24.00	19.98	20.17	0.97
13	28.00	21.20	21.39	0.92
Promedio			2.61	

Los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la Ec. (2) tienen excelente aproximación, la diferencia promedio entre ambos es de 2.61 %. Para caudales bajos menores a 2.0 l/s, la diferencia aumenta superando el valor de 5.0 %.

6.4 Medidor Palmer-Bowlus D = 40 cm

La comparación de los calados obtenidos mediante el análisis dimensional y la modelación numérica, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación de calados en el medidor Palmer-Bowlus D=40 cm, para varios caudales

Ensayo	Q (l/s)	Ho (cm)		Error relativo (%)
		Análisis Dimensional	M. Numérico	
1	2.50	9.12	10.05	10.10
2	5.00	11.57	12.18	5.25
3	10.00	14.82	15.17	2.39
4	15.00	17.19	17.53	1.96
5	20.00	19.12	19.50	1.96
6	25.00	20.78	21.21	2.05
7	30.00	22.25	22.75	2.21
8	35.00	23.59	24.11	2.24
9	40.00	24.81	25.37	2.27
10	45.00	25.94	26.52	2.23
11	50.00	27.00	27.59	2.17
12	55.00	28.00	28.54	1.91
13	60.00	28.95	29.45	1.72
14	70.00	30.71	31.17	1.50
Promedio			2.85	

Los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la Ec. (2) tienen excelente aproximación, el error relativo promedio entre ambos es de 2.85 %. Como se puede observar, para caudales mayores a 5 (l/s) es válido utilizar la curva obtenida mediante la modelación numérica.

En la Figura 4, se muestra la comparación de las curvas de descarga obtenidas mediante modelación CFD y análisis dimensional para medidores Palmer-Bowlus de: D=16 cm, D=20 cm, D=25 cm y D=40 cm; que corresponden a los diámetros de tubería más utilizados en los sistemas de alcantarillado de la EPMAPS.

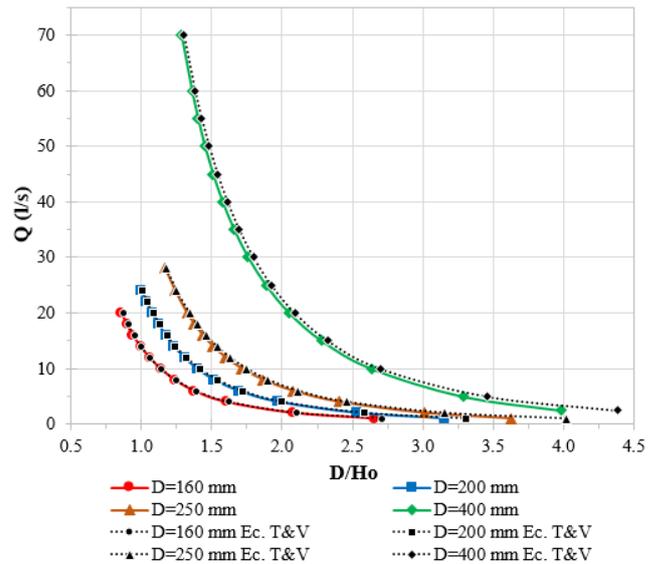


Figura 4. Curvas de descarga de los medidores Palmer-Bowlus D=16 cm, D=20 cm, D=25 cm y D=40 cm; obtenidas mediante los análisis numérico y dimensional

7. CONCLUSIONES

En general, los resultados obtenidos por medio del programa FLOW-3D para caudales superiores a 5.0 (l/s), son muy cercanos a los obtenidos con la fórmula propuesta por Torres & Vásquez (2010). La mayoría de los resultados de los modelos numéricos presentan una diferencia menor al 2%, con respecto a su contraparte teórica o física; por lo tanto, pueden ser utilizados en la etapa de diseño y operación de un medidor tipo Palmer-Bowlus.

Específicamente, el porcentaje de error relativo entre la fórmula propuesta por Torres & Vásquez (2010) y los resultados numéricos, son: para el medidor Palmer-Bowlus de D=16 cm, 1.0 %; para el medidor con D=20 cm, 1.3 %; mientras que para el medidor con de D=16 cm, 2.6%, este incremento es causado por el caudal 1 (l/s), si se excluye los caudales inferiores a 2 (l/s), se aproxima a 1.7 %; finalmente, para el medidor con D=40 cm, 2.9%, con la misma tendencia del caso anterior, para caudales pequeños se tiene mayor diferencia.

La rugosidad del material en este tipo de simulación no tiene mayor influencia; por lo que, es válido utilizar el valor de rugosidad recomendado en la literatura.

Respecto al tamaño de la celda, configurar un tamaño de celda igual a 1 cm, es adecuado para este tipo de modelaciones; ya que, el uso del computador (medido en horas) se septuplica si se disminuye a 0.5 cm y la diferencia entre los resultados es despreciable.

Cada modelación tuvo una duración entre 30 a 120 minutos, siendo la modelación del medidor con D=40 cm la que demandó mayor cantidad de escenarios (14 modelaciones individuales) y una duración individual de 120 minutos; lo que implicó 28 horas de uso computacional para la

obtención de su curva de descarga. En todas las modelaciones se utilizó un computador con las siguientes características: AMD RYZEN 7 1700 (16 núcleos a 3.9 Ghz), 32 Gb de RAM con una velocidad de 3000 Mhz y un disco duro para almacenamiento de 2 TB.

8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Debido a la cantidad de ensayos experimentales con caudales menores a $5.0\left(\frac{l}{s}\right)$ (un ensayo experimental), no se puede aseverar que la ecuación planteada por Torres & Vásquez (2010), en el rango entre $0\left(\frac{l}{s}\right)$ y $5\left(\frac{l}{s}\right)$, se aproxima a la realidad; por lo que se recomienda realizar más análisis en este intervalo y afinar el coeficiente de descarga.

El programa FLOW-3D es una herramienta muy potente, sin embargo, para optimizar el gasto computacional, y reducir la incertidumbre de los resultados es necesario iniciar con la determinación de: el fenómeno hidráulico a modelar, los escenarios, el grado de exactitud requerido, las condiciones de borde, el tamaño de malla, el tiempo disponible y la capacidad del ordenador; estas son cuestiones fundamentales que pueden demandar horas, días, semanas y hasta meses.

Si bien el FLOW-3D permite realizar la geometría tridimensional en el mismo programa, para geometrías complejas se sugiere el uso del programa CATIA V5, ya que presenta mejores prestaciones en la elaboración de dibujos tridimensionales que el programa AUTOCAD.

Para verificar tanto las curvas de descarga obtenidas en este estudio, como la ecuación teórica - experimental encontrada por Torres & Vásquez (2010), se recomienda modelar físicamente uno de los cuatro medidores Palmer-Bowlus, de preferencia el D = 40 cm, ya que en este se encuentran las mayores diferencias entre la fórmula propuesta por Torres & Vásquez (2010) y el modelo numérico.

A pesar de que, la aproximación entre los análisis físico y numérico es muy buena, en el peor de los casos 2.9 % y en mejor 1.0 %, el planteamiento de ensayos experimentales adicionales permitiría: afinar los coeficientes de descarga de la ecuación teórica - experimental y profundizar en el análisis del medidor con caudales menores a $5\left(\frac{l}{s}\right)$.

REFERENCIAS

- Aulestia, C. (2017). *Modelación numérica en tres dimensiones de flujo en las compuertas de la captación del Proyecto Toachi - Pilatón aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD)*. [Tesis Maestría]. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Casa, E. (2016). *Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD) Programa FLOW-3D*. [Tesis maestría]. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos* (Primera ed.). (J. Saldarriaga, Trad.) Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Domínguez, F. (1999). *Hidráulica* (Sexta Edición ed.). Santiago de Chile, Chile: Editorial Universitaria.
- Fernández, J. (2012). *Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Flow Science, Inc. (2016). *Flow-3D v11.2 Documentation*. Flow Science, Inc. Santa Fe: Flow Science.
- Ludwig, J., & Ludwig, R. (1951). Design of Palmer-Bowlus Flumes. *Seafe and Industrial Wastes*, 23(9), 1096-1107. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/25031687>
- Recasens, J. (2014). *Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero*. Barcelona: UPC BARCELONATECH.
- Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General Vol. 1*. México D.F.: LIMUSA S.A.
- Torres, C., & Vásquez, E. (2010). *Análisis de medidores de caudal para flujo subcrítico en sistemas de alcantarillado*. [Tesis ingeniería]. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method*. New York: John Wiley & Sons.

BIOGRAFÍAS

y Computacional de Fluidos, Modelación Física de Fenómenos Hidráulicos, Diseño de Obras Hidráulicas y Transporte de Sedimentos.



Jorge Augusto Toapaxi Alvarez, Ingeniero Civil. Magister en Recursos Hídricos con mención en “Diseño de Proyectos Hidráulicos” de la Escuela Politécnica Nacional (EPN). Ha trabajado en consultoría, desde el 2010. Profesor e Investigador del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA), desde el 2015. Ha desempeñado los cargos de:

Jefe del Laboratorio Docente de Hidráulica (2016-2019), Coordinador de la Maestría en Hidráulica (2018-2019), Director de Proyectos de Investigación en Mecánica Teórica - Computacional de Fluidos, desde el 2016. Actualmente, es doctorando en Tecnología y Modelización en Ingeniería Civil, Minera y Ambiental en la Universidad Politécnica de Cartagena (España).



Roberto Carlos Silva Bastidas, Ingeniero Civil experimentado con demostrada trayectoria en el campo de la Ingeniería Civil (hidráulica y construcción). Su trabajo se ha enfocado en los mayores proyectos hidroeléctricos en Ecuador, tales como: el Proyecto Sopladora, Toachi - Pilaton, trasvase Daule - Vinces,

Coca Codo Sinclair, etc. El proyecto previo a la obtención de su Maestría se basa en la modelación CFD del aforador Palmer – Bowlus.



Cristina Alexandra Torres Jacobowitz, Ingeniera Civil, Magister en Recursos Hídricos con mención en “Diseño de Proyectos Hidráulicos” de la Escuela Politécnica Nacional. Experiencia en diseño y evaluación de obras hidráulicas, modelación física y numérica de fenómenos hidráulicos, diseño vial, programación y dirección

de obras civiles. Actualmente trabaja como Profesora Ocasional a tiempo completo de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional. Sus intereses de investigación se enfocan en: Mecánica Teórica

