

SIMULACIÓN NUMÉRICA CON INTERFOAM DE UNA CÁMARA PARTIDORA DE CAUDALES

NUMERICAL SIMULATION WITH INTERFOAM OF A FLOW SPLITTING CHAMBER

Laura E. Motta Milesi, Tania L. Ferreyra e I. Matías Ragessi

Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Agustín Filloy s/n, 5000 Córdoba, Argentina, emottamilesi@mi.unc.edu.ar

Palabras clave: cámara partidora de caudales, Estación Depuradora de Aguas Residuales, inferFoam.

Resumen. Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) son fundamentales para la conservación del recurso hídrico. Las mismas tienen como objetivo conseguir a partir de aguas negras, un efluente de mejor calidad, que cumpla con ciertos parámetros o requerimientos, usualmente normados. Para lograr esto, se emplean numerosos tratamientos biológicos-físico-químicos, que ocurren de manera secuencial, en distintas unidades hidráulicas. En los tratamientos convencionales existe una etapa de sedimentación secundaria, en la cual el control de caudal en cada unidad es crucial para asegurar el correcto funcionamiento. En este trabajo, se ha estudiado particularmente el comportamiento hidráulico de una cámara partidora de caudales, mediante simulación numérica. Se trabajó con un modelo tridimensional a dos fases (aire-agua), de una sección del volumen de control. El software empleado es OpenFOAM®, con modelo de turbulencia kOmegaSST. El esquema de solución que se usó es interFoam. Por otra parte, se probaron diferentes resoluciones de mallados para poder comparar tiempos, órdenes de convergencia y resultados de distintos modelos, que servirían como antecedente para saber cómo modelar casos de similares características y escalas de ingeniería.

Keywords: flow-splitting chamber, wastewater treatment plants, interFoam.

Abstract. Wastewater treatment plants (WWTPs) are essential for water resource conservation. Their objective is to produce, from sewage, a higher quality effluent that meets certain parameters or standards. To achieve this, various biological-physical-chemical treatments are employed sequentially in different hydraulic units. Conventional treatments include a secondary sedimentation stage where flow control in each unit is crucial for ensuring proper operation. This study specifically investigates the hydraulic behavior of a flow splitter chamber using numerical simulation. A two-phase (air-water), three-dimensional model of a control volume section was utilized. OpenFOAM® software was employed with the kOmegaSST turbulence model, using the interFoam solution scheme. Additionally, different mesh resolutions were tested to compare computational times, convergence orders, and results from various models. These findings serve as a precedent for modeling similar engineering cases and scales.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se sabe que el agua dulce es un recurso limitado, no sólo en lo referente a cuestiones de cantidad, sino también en los aspectos relacionados con la calidad. Los asentamientos urbanos suponen demandas concentradas de agua dulce, pero también son fuente de generación de efluentes que deben ser tratados. Dentro de los tratamientos para los efluentes urbanos a gran escala, encontramos las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). El objetivo de las EDAR es conseguir a partir de aguas negras, un efluente que cumpla con ciertos parámetros o requerimientos, para obtener un efluente de mejor calidad. Los requisitos o parámetros establecidos dependen de las normativas de cada lugar, ya que los efluentes pueden tener distintas características o volúmenes, o bien por las limitaciones de las tecnologías disponibles para su tratamiento. Las estaciones depuradoras de aguas residuales, cumplen un rol fundamental en la preservación del recurso hídrico en sí y del medio en general, ya que aseguran o cumplen con ciertos requerimientos mínimos para la reincorporación de estos efluentes a los cursos de agua.

Una EDAR consiste en un conjunto de unidades hidráulicas interconectadas, donde se van desarrollando diversos tratamientos biológicos, físicos y químicos de manera secuencial. En los tratamientos convencionales, hay una primera etapa de desbaste o separación física mediante rejillas o tamices, donde se eliminan las fracciones sólidas de mayor tamaño. Luego hay una etapa de tratamiento primario de decantación, donde se intenta eliminar una porción de los sólidos suspendidos, en la cual se suelen emplear aireadores, y productos químicos (floculantes y coagulantes). Seguida a esta etapa, se encuentra el tratamiento secundario, que es principalmente un tratamiento de tipo biológico, donde se busca eliminar la materia orgánica y algunos nutrientes como el fósforo y el nitrógeno; tras el proceso biológico hay una sedimentación secundaria, donde se forman lodos. Finalmente, hay un tratamiento terciario, que tiene por objetivo mejorar la calidad del agua para poderla reincorporar a los cursos de agua; usualmente este tratamiento se hace mediante camas de arena o con desinfección con cloro o radiación. Como es de suponerse, para que se lleven a cabo las reacciones tanto biológicas como químicas, es necesario un determinado tiempo de permanencia o de contacto; es por esto, que en la etapa de sedimentación secundaria, es fundamental el control de los caudales que ingresan y egresan, para asegurar el correcto funcionamiento de la unidad.

En este trabajo, se ha estudiado particularmente el comportamiento hidráulico de la unidad que vincula el tratamiento primario (cámara de aireación), con los sedimentadores secundarios. Esta vinculación es mediante una cámara partidora de caudales que recibe el efluente a través de dos ingresos desde la cámara de aireación y lo distribuye en seis conductos, que desembocan en un sedimentador secundario cada uno. El objetivo principal es ajustar una curva altura-caudal ($H-Q$) en la cámara para poder establecer un control del proceso y verificar cómo es la distribución de caudales entre los sedimentadores secundarios, ya que no cuenta con ningún instrumento instalado para medir caudal. Aquí es donde cobra importancia recurrir a la Fluidodinámica Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), dado que el efluente en esta instancia, es aún un efluente sucio, con alta carga de materia y patógenos, que limitan la utilización de algunos instrumentos. Para poder aplicar esta metodología, se debe validar para garantizar que los resultados obtenidos sean independientes de la resolución de la malla utilizada y represente con suficiente grado de exactitud el fenómeno observado. Se realizó un estudio de las mallas, para tener una noción de qué resoluciones resultan convenientes para trabajar problemas de ingeniería de similares escalas y características hidráulicas.

2. MODELO NUMÉRICO

Para modelar el problema se empleó el software OpenFOAM®, que es de código libre y abierto. A continuación, se detalla la construcción del caso y las consideraciones realizadas.

2.1. Dominio y discretización

Para realizar el diseño geométrico, se consideraron las dimensiones indicadas en los planos de diseño de una cámara partidora de caudales que actualmente está en funcionamiento en la Provincia de Córdoba y se realizaron ajustes con mediciones in situ. La cámara partidora de caudales recibe el efluente desde dos unidades de aireación y lo divide en 6 cámaras que van a un sedimentador secundario cada una. En la Figura 1, se muestran verde las entradas del flujo, que son de área equivalente a dos tubos de diámetro 1800mm cada uno; en rojo las 6 salidas a los sedimentadores, que son de diámetro 1100mm cada una; en azul los tabiques y en gris todas las paredes de la geometría simulada. En la Tabla 1 se muestran los límites geométricos en cada dirección.

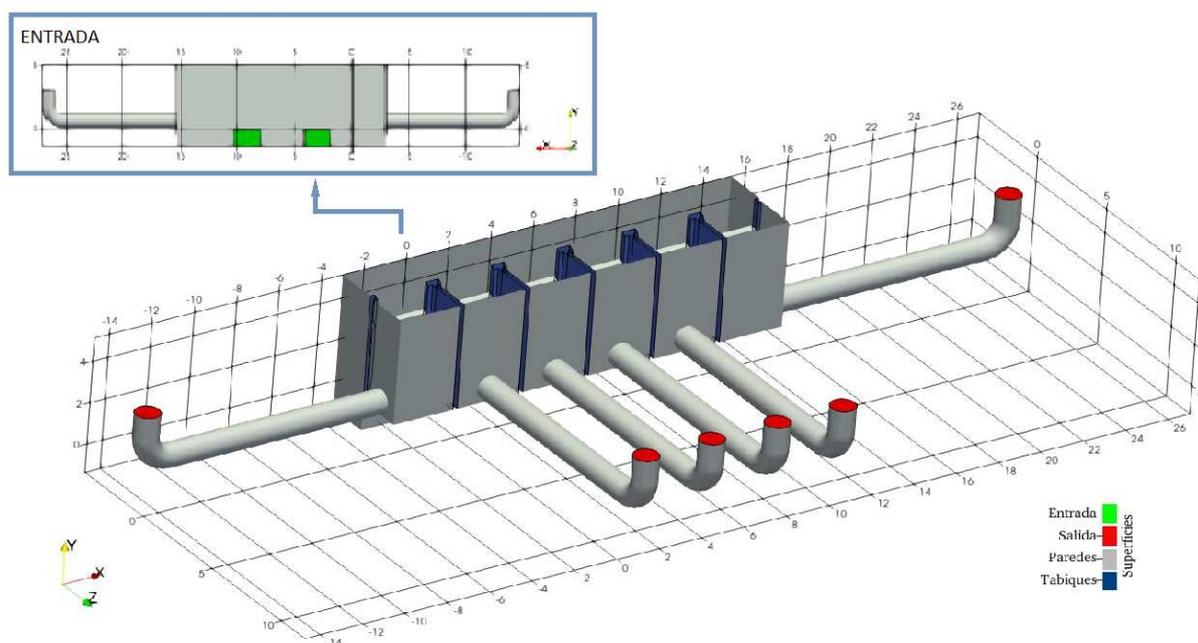


Figura 1: Geometría simulada

Coordenadas	Mínima	Máxima	Delta
X	-14,70	27,02	41,72
Y	-1,37	5,12	6,49
Z	-4,20	11,70	15,90

Tabla 1: Límites del dominio

La geometría se construyó empleando conjuntamente los software GMSH ([Geuzaine y Remacle, 2009](#)), que es de código libre, AutoCAD y la función SnappyHexMesh de OpenFOAM®.

La malla se realizó con GMSH, cuya resolución se eligió tras efectuar un análisis de convergencia de malla, con el método de Extrapolación de Richardson, para asegurar que los resultados

obtenidos, son independientes de la misma. Esta metodología emplea el Método de la Bisección para calcular el orden de convergencia (p), cuyo valor ideal teórico es de 2; y, consiste en comparar los resultados obtenidos por un mismo mallado en 3 resoluciones distintas, con al menos un 30 % de diferencia de tamaño entre sus celdas representativas (h). La longitud de celda representativa (h) se calcula como el volumen total elevado a $1/3$ y dividido la cantidad total de celdas. Para verificar que entre una versión y la otra haya al menos un 30 % de diferencia, se calcula el radio (r), que es cociente entre una versión de menor resolución por otra de mayor resolución. Luego, una vez que se tienen resultados de dos resoluciones distintas, se puede calcular el valor relativo. Por otra parte, como se ha utilizado la Extrapolación de Richardson se puede obtener un valor extrapolado de la solución para una malla de infinita resolución, que se puede utilizar para calcular un error relativo extrapolado que indica cuán lejos está la solución para esa resolución, de la solución para una malla con infinita resolución. Por último, también se calculó el Índice de Convergencia de la Malla (GCI, por sus siglas en inglés). Este índice es otra métrica para estimar el error, que escala el error relativo por un factor que tiene en cuenta el radio y el orden de convergencia de la ecuación, además de un factor de seguridad. Las tres métricas de error presentadas, son estimaciones del mismo.

Para poder determinar la resolución a utilizar, se modelaron 3 mallas (de 5cm, 7,5cm y 10cm) y seleccionaron variables de interés. Se buscó que tanto el error relativo extrapolado como el error relativo entre resoluciones sucesivas sea menor al 10 % y que el índice convergencia de la malla esté en el orden del 1 %. Por los objetivos del trabajo, se corrieron casos de pruebas y se realizó el análisis de convergencia para las variables magnitud de velocidad y nivel de agua.

En la Tabla 2, se muestran los valores obtenidos promediados de una sección transversal del tubo, a 8m desde la salida del vertedero, para la magnitud de la velocidad, correspondientes a los 310 segundos de simulado:

Nomenclatura	Cantidad Celdas	h (m)	U (m/s)	r	Error relativo	Extrapolación (m/s)	Error relativo Extrapolado	GCI
B1	768000	5,52E-06	0,3364	3,20	6,46%	0,3355	0,25%	0,31%
C	240135	1,77E-05	0,3581				6,73%	
D	76830	5,52E-05	0,3589	3,12	0,21%		6,95%	-

Tabla 2: Analisis de convergencia para U

Como se puede observar, los errores relativos y los errores relativos extrapolados, están por debajo del 10 %, además, el valor de GCI es pequeño, lo que significa que nos estamos aproximando a la zona asintótica de la curva de la solución.

El mismo análisis se realizó para el nivel de la superficie libre, aguas arriba y aguas abajo del vertedero, ya que era otra variable de interés para la elaboración de la curva H-Q. A continuación, se muestran en la Tabla 3, los valores obtenidos para el nivel de la superficie libre, 0,5m aguas arriba del vertedero, correspondientes a los 310 segundos de simulado:

Nomenclatura	Cantidad Celdas	h (m)	A _{War} (m)	r	Error relativo	Extrapolación (m)	Error relativo Extrapolado	GCI
B1	768000	5,52E-06	3,480	3,20	1,09%	3,495	0,45%	0,56%
C	240135	1,77E-05	3,442				1,53%	
D	76830	5,52E-05	3,316	3,12	3,64%		5,11%	-

Tabla 3: Análisis de convergencia para el Nivel de la Superficie Libre, aguas arriba del vertedero

Como se puede observar, al igual que para la variable anterior, los errores relativos y los errores relativos extrapolados, están por debajo del 10 %. El valor de GCI también es pequeño, por lo que nuevamente consideramos que nos estamos aproximando a la zona asintótica de la curva de la solución.

Considerando estos resultados, para hacer la modelación numérica se optó por trabajar con un modelo “C” (de resolución intermedia y celdas de aproximadamente 7,5cm de lado); ya que los errores son considerados aceptables y el tiempo de cálculo es notablemente menor que el necesario para trabajar con una mayor resolución.

2.2. Ecuaciones y esquema numérico

El esquema de solución que se eligió es interFoam, que trabaja con el método de volúmenes finitos para 2 fluidos isotérmicos, incompresibles e inmiscibles. Esto significa que las propiedades de los fluidos son constantes, excepto en la interfase, y que, utilizando un volumen de líquido (VOF, por sus siglas en inglés), elimina la fracción de la interfaz. Las ecuaciones que resuelve son las de Navier Stokes promediadas según Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés), ecuación de Continuidad (Ver Ec.(1) y ecuación de Cantidad de Movimiento (2)) :

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{-\partial(p)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} \tau_{\tau ij}) + \rho g_i + f_{\sigma i} \quad (2)$$

Donde: u es la velocidad; g_i es la gravedad; p es la presión; τ_{ij} es la tensión viscosa; $\tau_{\tau ij}$ es la tensión viscosa turbulenta ; $f_{\sigma i}$ es la tensión superficial y ρ es la densidad. A su vez, la densidad está definida por la siguiente ecuación (Ec.(3)):

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (3)$$

Donde: α puede valer 0 (aire) o 1 (agua), y los valores intermedios entre estos en la interfase. La tensión superficial se modela como una fuerza continua (Ec.(4)):

$$f_{\sigma i} = \sigma k \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (4)$$

Donde: σ es la constante de tensión superficial y k la curvatura, dada por (Ec.(5)):

$$k = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right) \quad (5)$$

Además, para la interfase, se debe resolver una ecuación adicional (Ec.(6)):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

2.3. Modelo de cierre de la turbulencia

Al trabajar con las ecuaciones RANS, es necesario utilizar modelos de cierre de la turbulencia. En este trabajo se optó por utilizar el modelo $k\omega$ SST (Menter et al., 2003), donde SST significa Transporte por Esfuerzo Cortante (en inglés Shear Stress Transport). El modelo es el propuesto por Menter y Esch (2001), pero con los coeficientes actualizados presentados en The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model (<http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>) y por Menter et al. (2003); y el término adicional F3 (Hellsten, 1997) para paredes rugosas igual a cero. La particularidad del modelo de cierre $k\omega$ SST, es que combina los modelos $k-\epsilon$ y $k\omega$. En las zonas cercanas a la pared, utiliza el modelo $k\omega$ y fuera de la capa límite $k-\epsilon$. El modelo resuelve dos ecuaciones de conservación: una para la energía cinética turbulenta y otra para la tasa específica de disipación.

3. MODELACIÓN

Para la construcción de la curva H-Q (altura-caudal) se modelaron 6 escenarios, con un delta de 500m³/h entre ellos. Se tomó como referencia para la elección de los caudales el rango de operación normal de la planta y se ensayó un caudal menor a este y otro mayor. En la Tabla 4 se muestran los caudales ensayados para cada modelo.

Modelo	Q (m ³ /h)	Q (m ³ /s)
Q6000	6000	1,67
Q6500	6500	1,81
Q7000	7000	1,94
Q7500	7500	2,10
Q8000	8000	2,22
Q8500	8500	2,36

Tabla 4: Caudales Modelados

3.1. Construcción de la curva H-Q

En todos los modelos se tomó la altura media del nivel de aguas (“alpha.water.mean”) en la cámara de entrada, a una distancia $Z = -3,5\text{m}$, a la cual se debió restarle la altura del vertedero ($H_0 = 5,19\text{m}$) para obtener la altura (H) sobre el nivel del mismo necesaria para realizar la construcción de la curva. A continuación, en la Tabla 5 se muestran los valores obtenidos para los distintos escenarios y el error relativo entre el caudal obtenido en el modelo y el caudal obtenido por una curva de ajuste entre los valores de todos los escenarios, que se muestra en la Figura 2. Cabe aclarar que se realizó un ajuste lineal con $H^{3/2}$, ya que típicamente los vertederos rectangulares tienen una función de ajuste que depende de $H^{3/2}$ (Ver Ec.(7))

$$Q = Cd.B.H^{3/2} \quad (7)$$

Donde: Q es el caudal; Cd el coeficiente de descarga; B el ancho del vertedero y H la lámina de agua sobre el vertedero. Sin embargo, por la ausencia de datos experimentales, por las pequeñas variaciones de la altura H (del orden del centímetro) y de las condiciones que debe cumplir tanto el flujo como la configuración de los vertederos, para las que se desarrolló dicha ecuación, no se realiza el despeje de manera directa, sino que se busca hallar cómo es la variación del caudal en función de $H^{3/2}$.

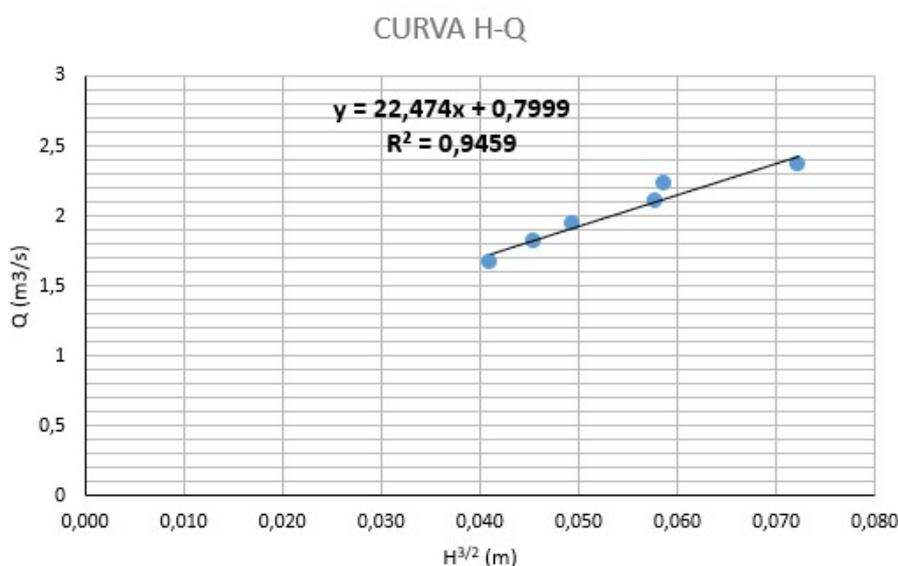


Figura 2: Ajuste curva H-Q

H (m)	$H^{3/2}$ (m)	Q_ecuacion	Q_modelo	ErrorQ (%)
0,117	0,041	1,724	1,670	3,20%
0,125	0,046	1,823	1,810	0,70%
0,132	0,050	1,913	1,940	1,40%
0,146	0,058	2,099	2,100	0,05%
0,147	0,059	2,118	2,220	4,59%
0,169	0,072	2,423	2,360	2,68%

Tabla 5: Alturas y caudales obtenidos

Como se puede observar, el ajuste de la curva es bastante bueno, ya que el error relativo en todos los casos es menor al 5%.

3.2. Distribución del caudal

Para conocer si el funcionamiento de la unidad en cada escenario, era correcto, se analizó también la distribución del caudal entre las cámaras. Para esto, se integró la velocidad en la dirección principal del flujo (U_z), en una sección del tubo de salida (aproximadamente a la mitad

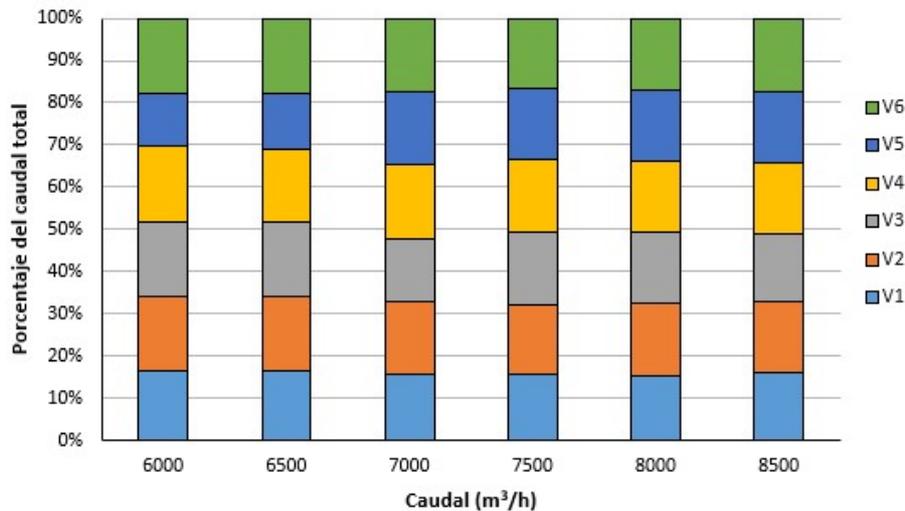


Figura 3: Distribución de caudales

de los mismos), utilizando la herramienta IntegrateVariable del software ParaView. En la Figura 3 se muestra para cada caudal de ensayo, el porcentaje del mismo que pasa por cada vertedero. En la Tabla 6 se muestran estos resultados numéricamente.

Q (m ³ /h)	Distribución del caudal					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
6000	16,4%	17,6%	17,7%	18,2%	12,5%	17,7%
6500	16,3%	17,8%	17,7%	17,2%	13,1%	17,9%
7000	15,5%	17,6%	14,6%	17,6%	17,3%	17,5%
7500	15,6%	16,6%	17,1%	17,2%	16,7%	16,8%
8000	15,4%	17,1%	17,0%	16,9%	16,8%	16,9%
8500	16,2%	16,7%	16,1%	16,5%	17,0%	17,4%

Tabla 6: Distribución de caudales

Como se puede observar, para el caudal más bajo, la mayor diferencia porcentual de evacuación de caudal es de un 5,7 %; para un caudal de 6500 m³/h, es de 4,9 %; para un caudal de 7000 m³/h, es de 3 %; y luego, para los caudales mayores es menor al 2 %. Por esto se puede decir que a medida que crece el caudal, la distribución se hace más equitativa.

4. CONCLUSIONES

El modelo permite obtener información valiosa sobre el funcionamiento general de la unidad hidráulica. La resolución de celda de 7,5cm de lado es adecuada para este tipo de problemas. Podemos notar que el caudal resultante final en cada modelo, asumido como la suma de los caudales en cada cámara, se ajusta con el caudal entrante simulado, por lo que se cumple la continuidad en el problema. Si bien las diferencias en la distribución de caudales son pequeñas, se puede adoptar la hipótesis que estas son debidas a que los anchos de los vertederos no son iguales para todas las cámaras. En cuanto a la curva H-Q, se considera que un ajuste lineal del caudal con $H^{3/2}$ es adecuado. No obstante, como las diferencias de nivel entre los caudales

son del orden del centímetro, no se considera que los valores obtenidos permitan medir a un operario con una regla o nivel el caudal circulante, con cierto grado de precisión.

Para avanzar en la validación del modelo, deberían realizarse mediciones experimentales para poder contrastar los datos; sin embargo, estos son sumamente difíciles de conseguir por las características del efluente y porque la estructura no cuenta con ningún instrumento de medición.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo utilizó recursos computacionales del CCAD de la Universidad Nacional de Córdoba (<https://ccad.unc.edu.ar/>), que forman parte del SNCAD del MinCyT de la República Argentina.

REFERENCIAS

- Geuzaine C. y Remacle J. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79(11), páginas pp. 1309–1331, 2009.
- Hellsten A. Some improvements in menter's k-omega-sst turbulence model. *29th AIAA Fluid Dynamics Conference*, páginas AIAA–98–2554, 1997.
- Menter F.R. y Esch T. Elements of industrial heat transfer prediction. *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, página (COBEM), 2001.
- Menter F.R., Kuntz M., y Langtry R. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 4:625 – 632, 2003.
- OpenCDF (2005) (<http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>).
- OpenFOAM®(2023) (<http://www.openfoam.com/>).
- The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model (2003) (<http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>).