

Análisis de modelaciones de canal abierto con reducción en OpenFOAM

OpenFOAM reduced channel modeling análisis

Análise de modelos de canal aberto com redução no OpenFOAM

Mónica Yineth Lara Pérez¹
 Elias Daniel David Nova Burgos²
 Martha Patricia Montenegro Carrillo³
 Angélica María Tibidor Jara⁴

Received: October 15th, 2022

Accepted: January 30th, 2023

Available: May 1st, 2023

How to cite this article:

M. Y. Lara-Pérez, E. D. D. Nova-Burgos, M. P. Montenegro-Carrillo, A. M. Tibidor-Jara, "Análisis de modelaciones de canal abierto con reducción en Openfoam", *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 19, n.º 2, pp. 1-21, 2023. doi: <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2023.02.01>

Research article. <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2023.02.01>

¹ Ingeniera civil, magister en Ingeniería Civil con énfasis en Hidroambiental. Docente Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Santo Tomás – Villavicencio.

Email: monicalara@usantotomas.edu.co.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8397-565X>.

CvIac: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001420082

² Ingeniero civil, ingeniero sanitario. Docente Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Santo Tomás – Villavicencio.

Email: eliasnova@usantotomas.edu.co.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5853-4230>.

CvIac: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001777120

³ Estudiante Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Santo Tomás – Villavicencio.

Email: marthamontenegro@usantotomas.edu.co.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1742-741X>.

CvIac: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001742052

⁴ Estudiante Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Santo Tomás – Villavicencio.

Email: angelicatibidor@usantotomas.edu.co.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2680-1132>.

CvIac: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001838689



Resumen

Introducción: el artículo es producto de la investigación "Análisis de modelos de canal abierto con reducción en OpenFOAM" desarrollada en la Universidad Santo Tomás en el año 2022 integrando la dinámica de fluidos computacional (CFD), en un canal abierto con reducción de flujo multifásico, isotrópico, isotérmico, turbulento y en estado estacionario.

Problema: el abastecimiento de agua potable requiere un tratamiento eficiente, para lo cual es necesario conocer en detalle los procesos hidrodinámicos y fisicoquímicos de las unidades de la planta de tratamiento. La simulación se utiliza para reducir costes y realizar múltiples experimentos. Un sistema robusto de lectura de parámetros hidráulicos aumenta la fiabilidad de la modelización [1]. La mayor fuente de datos experimentales conduce a un modelo más fiable.

Objetivo: familiarizar al lector con las herramientas para el aprendizaje y optimización de sistemas convencionales de tratamiento para abastecimiento de agua humana. La investigación también contribuye a garantizar la sostenibilidad del medio ambiente y a reducir la proporción de personas sin acceso sostenible a los servicios de agua y saneamiento, especialmente en las zonas rurales, donde la falta de infraestructuras hídricas es un problema frecuente.

Método: simulación de modelos complejos de turbulencia mediante ecuaciones de conservación de energía, masa y momento mediante solvers OpenFOAM.

Resultados: existe convergencia desde el tiempo 5.952, ya que a partir de este tiempo, la mayoría de los valores límite residuales son del orden de 10^{-3} y 10^{-4} , y teniendo en cuenta el estado del arte que establece que la solución ha convergido si el residuo es del orden de estos valores.

Conclusiones: se ha realizado un aporte al conocimiento de la dinámica de fluidos computacional, generando un acercamiento al modelamiento de canales a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás, para avances en futuras investigaciones, de este modo se fortalece, de manera institucional, el uso de OpenFOAM para el modelamiento de problemas complejos en sistemas de transporte de agua.

Palabras clave: canal de reducción, dinámica de fluidos computacional (CFD), OpenFOAM, proceso de simulación, validación.

Abstract

Introduction: The article is a product of the research "Analysis of open channel models with reduction in OpenFOAM" developed at Universidad Santo Tomás in 2022 integrating computational fluid dynamics (CFD), in an open channel with reduction of multiphase, isotropic, isothermal, turbulent and steady state flow.

Problem: Drinking water supply requires efficient treatment, and to achieve this, the hydrodynamic and physicochemical processes of the treatment plant units must be known in detail. Simulation is used to reduce costs and to perform multiple experiments. A robust hydraulic parameter readout system increases the reliability of modeling [1]. The larger source of experimental data leads to a more reliable model.

Objective: Familiarize the reader with the tools for learning and optimization of conventional treatment systems for human water supply. Research also contributes to ensuring environmental sustainability and reducing the proportion of people without sustainable access to water and sanitation services, especially in rural areas where lack of water infrastructure is a prevalent problem.

Method: Simulation of complex turbulence models by means of energy, mass and momentum conservation equations by means of OpenFOAM solvers.

Results: There is a convergence since time 5952, since after this time most of the residual limit values are in the order of 10^{-3} and 10^{-4} , and taking into account the state of the art which states that the solution has converged if the residual is in the order of these values

Conclusions: A contribution has been made to the knowledge of computational fluid dynamics, generating an approach to the modeling of channels to the students of the civil engineering faculty of the Santo Tomas University, for advances in future research, thus strengthening in an institutional way the use of OpenFOAM for the modeling of complex problems in water transport systems.

Keywords: Reduction channel, computational fluid dynamics (CFD), OpenFOAM, simulation process, validation.

Resumo

Introdução: o artigo é produto da pesquisa "Análise de modelos de canal aberto com redução em OpenFOAM" desenvolvida na Universidade Santo Tomás em 2022 integrando fluidodinâmica computacional (CFD), em um canal aberto com redução de fluxo multifásico, isotrópico, isotérmico, turbulento e estacionário.

Problema: o abastecimento de água potável requer um tratamento eficiente, para o qual é necessário conhecer detalhadamente os processos hidrodinâmicos e físico-químicos das unidades de tratamento. A simulação é usada para reduzir custos e realizar vários experimentos. Um sistema robusto de leitura de parâmetros hidráulicos aumenta a confiabilidade da modelagem [1]. A maior fonte de dados experimentais leva a um modelo mais confiável.

Objetivo: familiarizar o leitor com as ferramentas para aprendizado e otimização de sistemas convencionais de tratamento de água para abastecimento humano. A pesquisa também contribui para garantir a sustentabilidade ambiental e reduzir a proporção de pessoas sem acesso sustentável a serviços de água e saneamento, especialmente em áreas rurais, onde a falta de infraestrutura hídrica é um problema frequente.

Método: simulação de modelos complexos de turbulência usando equações de conservação de energia, massa e quantidade de movimento usando solucionadores OpenFOAM.

Resultados: há convergência a partir do tempo 5.952, pois a partir deste momento a maioria dos valores limites residuais são da ordem de 10^{-3} e 10^{-4} , e tendo em conta o estado da arte que estabelece que a solução tem convergência se o resíduo for da ordem desses valores.

Conclusões: foi feito um contributo para o conhecimento da dinâmica dos fluidos computacional, gerando uma abordagem à modelação de canais para os alunos da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Santo Tomás, para avanços em investigações futuras, fortalecendo assim, institucionalmente, o uso de OpenFOAM para modelagem de problemas complexos em sistemas de transporte aquaviário.

Palavras-chave: canal de redução, dinâmica de fluidos computacional (CFD), OpenFOAM, processo de simulação, validação.

1. Introducción

Suplir la demanda creciente de agua para consumo humano es posible por medio del tratamiento eficiente de este recurso cuando se realiza de forma sencilla, económica y eficiente. Esto debido a la importancia de la calidad del agua que puede medirse teniendo en cuenta distintos parámetros para cuantificar el grado de alteración de sus cualidades, se genera, entonces, un índice de calidad de agua que integra información de varios parámetros que se analizan para determinarla [3] y establecer el tipo de tratamiento que se requiere, y para que el tratamiento sea eficiente,

se debe conocer detalladamente la hidrodinámica y los procesos fisicoquímicos de las diferentes unidades que componen las plantas de tratamiento.

La mecánica de fluidos ha buscado investigar y desarrollar modelos matemáticos que describan el comportamiento hidrodinámico de los fluidos con el fin de operar, optimizar y diseñar los sistemas de la manera más económica y eficiente en consumo de energía [1]. Con el avance de las tecnologías se ha podido utilizar programas que asisten en la búsqueda de soluciones a estos modelos extensos. La dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) modela parámetros hidráulicos como la velocidad, presión y tirante de agua, por medio de la integración de las ecuaciones de Euler para fluidos viscosos y Navier-Stokes, respecto a los modelos de conservación de energía, masa y *momentum*. OpenFOAM, por otro lado, es un *software* CFD de acceso público y que trabaja bajo el sistema operativo Linux, ejecutable en Windows por medio de Ubuntu, usa solucionadores en el lenguaje de programación C++ para resolver estas ecuaciones de conservación antes mencionadas. El *software* usa un método tensorial y el método de volúmenes finitos, los cuales pueden ser revisados al detalle en Moukalled *et al.* [1].

Para obtener resultados confiables en la representación de las unidades de tratamiento del agua por medio de simulaciones, se recomienda como mínimo contar una independencia de la malla (selección correcta del tamaño de la malla), un solucionador según el caso de estudio y una validación o verificación de los datos simulados y experimentales [10].

El tamaño óptimo de la malla se logra por medio de un análisis de la sensibilidad de la malla. Es decir, proponer refinamientos, principalmente en las zonas cercanas a la pared de los tanques y permitir discretizaciones gruesas en la zona central, en donde no se esperan grandes variaciones entre celdas. Se dice que se logra una independencia de malla cuando los resultados de los campos estudiados dejan de presentar variaciones significativas [1]. A medida que el tamaño de la malla gruesa original se hace más fina, los resultados se acercan más a los valores de los datos experimentales, siempre y cuando no se comprometan los tiempos computacionales de simulación. Heyrani *et al.* realizaron un estudio de canales abiertos donde el número inicial de celdas era 52.200, y se aumentó gradualmente a 74.496 y luego a 263.700. Los autores concluyen que los resultados de las dos últimas mallas más finas, no se registraron cambios significativos en la calidad de los datos simulados y por esto se logró un tamaño óptimo de malla [2].

Por parte del solucionador se debe tener en cuenta tanto el tipo de solucionador como el análisis de su convergencia [4]. El solucionador *interFoam* para flujos *Multiphase*, por ejemplo, gas-líquido, resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para

dos fluidos inmiscibles isotérmicos e incompresibles, con en el enfoque de volumen de fluido (vof) [10]. Al tratarse de un flujo dominado por la tensión superficial, la formulación de momento en interFoam está diseñada para producir un equilibrio discreto entre el gradiente de presión y la tensión superficial [6]. Por otro lado, para verificar la convergencia o verificación teórica del modelo matemático, es necesario revisar los límites residuales con el fin de verificar su veracidad [1]. El residual o error es una medida del desequilibrio en las ecuaciones de conservación y se acepta la convergencia cuando el residual es del orden de $10^{-3} - 10^{-4}$ [14], y dependiendo también del campo de estudio.

La validación garantiza la veracidad de la representación del fenómeno de estudio, la cual se realiza por medio de un proceso de análisis de errores que permite comparar los valores simulados vs. experimentales. Pudiendo optar por una extensa lista de métodos para comparar los datos, los más usados, son el error cuadrático medio y el error relativo; estos dos con opiniones diferentes según los autores y el origen de los datos [4][5].

El error cuadrático medio o MSE mide la magnitud de error (ecuación 1). La raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos (ecuación 2). El MAPE (*mean absolute percentage error* o error medio absoluto ponderado) permite medir la precisión en porcentaje que busca evaluar el rendimiento de modelos de pronóstico (ecuación 3). Mientras que MAE (*mean absolute error* o error absoluto medio) analiza qué tan cercano es la predicción hecha al resultado real, se parte haciendo una diferencia entre el valor obtenido y el valor experimental en valor absoluto y luego se le calcula el promedio (ecuación 4).

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Ecuación 1. Error cuadrático medio

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}$$

Ecuación 2. Raíz del error cuadrático medio

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

Ecuación 3. Error medio absoluto ponderado.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|$$

Ecuación 4. Error absoluto medio.

Donde y_j o y_i son valores experimentales, $\hat{y}_j$ o $\hat{y}_i$ son valores estimados, N es el tamaño de la muestra.

El presente estudio busca familiarizar a los lectores con los procesos de aprendizaje y diseño con dinámica computacional para sistemas de tratamiento de aguas para consumo humano, por medio de la integración de la simulación matemática de un canal abierto de flujo multifase, turbulento y analizado en estado estable. Teniendo en cuenta que no se realizaron la etapa de calibración, debido a la limitación tecnológica principalmente de parámetros de turbulencia.

1.1 Revisión de literatura o antecedentes de investigación

Se realizó un análisis hidráulico de un vertedero compuesto (triangular-rectangular) mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), donde usó la tecnología de simulación Ansys Workbench V14.5 que utiliza las ecuaciones generales de transporte de fluidos, también llamadas ecuaciones de Navier-Stokes (NS). Este CFD utiliza el método de volumen finito (FVM), que divide el dominio en un número finito de celdas sobre las que se impone la conservación discreta de la variable [10]. Además, se utilizó el módulo Meshing para generar la malla del dominio, para la discretización espacial y se decidió emplear una malla predominantemente hexaédrica para reducir el número de elementos de dominio y la mejora de la convergencia de la solución [17].

Díaz [13] simuló, en la Universidad Santo Tomás con CFD (software OpenFOAM), un canal abierto con vertedero rectangular y triangular, donde analizaron el tiempo de cómputo requerido, teniendo en cuenta el *hardware* utilizado, con respecto a la calidad y geometría de la malla, la escala de tiempo analizada y las variables incluidas. El autor determinó que los tetraedros deben tener dimensiones entre 0,05 y 0,01 m, estos límites se establecieron con el fin de encontrar un equilibrio entre la calidad de la modelación y el tiempo del cálculo [11].

Por parte de la validación, Negrón utiliza en su artículo sobre la predicción en el comportamiento de acciones (en economía) del IPSA la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio ponderado (MAPE), el error absoluto medio (MAE), el coeficiente de determinación (R^2) y la validación cruzada generalizada (GCV) para la comparación de sus datos predichos frente a los datos reales de las acciones [3]. Los modelos de análisis de errores que usa Negrón son aplicables a otros casos de estudio además de los análisis de acciones en la bolsa. Por ejemplo, también se pueden usar estos modelos en el análisis de canales abiertos, específicamente aliviaderos, como se muestra en el artículo publicado por [4].

Jiang *et al.*, en su artículo realizan la comparación de un vertedero rectangular de cresta ancha con una cara inclinada aguas arriba, por medio del método del

error cuadrático medio (RMSE) y error porcentual absoluto medio (MAPE). También, se estudió el efecto del ángulo aguas arriba en un flujo sobre un vertedero trapezoidal y las herramientas de código abierto de OpenFOAM [5]. Heyrani validó su estudio de canales abiertos con el coeficiente de determinación (R^2) y error porcentual absoluto medio (MAPE) [9].

2. Materiales y métodos

2.1 Instrumentos/Materiales

Canal hidráulico de ensayos referencia FC300 de la marca TecQuipment Ltd., el cual cuenta con un panel que permite controlar caudales hasta un máximo de 38 l/s que son suministrados por una bomba centrífuga de 4 kW de potencia [13]. Este canal es compatible con diferentes accesorios como lo la reducción que cambia el ancho del canal de 32 cm a 18 cm y cuenta también con medidores de presión en el fondo del canal.



Figura 1. Canal de flujo abierto con reducción

Fuente: [6].

También se utilizó el caudalímetro de velocidad y la cinta métrica para realizar las medidas de los tirantes.



Figura 2. Caudalímetro de velocidad
Fuente: [7].

2.2 Toma de datos experimentales

Para definir el dominio físico se necesita tomar las medidas con la cinta métrica de las dimensiones del canal hidráulico. Las medidas del canal serán las dimensiones que definen el dominio bajo consideración y con el cual se trabajarán las simulaciones del modelo matemático.

2.3 Proceso de simulación

Para empezar con las simulaciones, se necesita fortalecer conocimientos en las áreas de mecánica computacional de fluidos, con énfasis en el método de los volúmenes finitos, representación tridimensional de objetos, con herramientas CAD (tipo Civil 3D) y Blender. También, conocer y comprender los fenómenos de turbulencia y el resalto hidráulico mediante una revisión de la literatura sobre los temas relacionados al proyecto, esto con ayuda de artículos y libros proporcionados por la base de datos de la universidad.

Todos los casos en OpenFOAM parten de determinar los parámetros de las carpetas "0", "Constant" y "System" y sus respectivos archivos contenidos en esta. Para aprender cómo funciona el *software* OpenFOAM mediante la simulación, se recomienda revisar los casos tutoriales que trae, esto para poder modelar correctamente el canal con reducción o cualquier dominio más complejo como una unidad en una planta de tratamiento.

Teniendo los conocimientos previos, se continúa definiendo el dominio bajo consideración, construyendo un modelo CAD tridimensional del canal con reducción, ingresado como dato de entrada al *software* OpenFOAM. Para definir el dominio se necesita tomar las medidas de las dimensiones del canal proporcionado por la Universidad Santo Tomás-Villavicencio en el laboratorio de hidráulica. Las medidas del canal serán las dimensiones que se implementarán en la simulación del modelo matemático.

Una vez el dominio está definido, este se discretiza desarrollando el correcto mallado del modelo y definiendo las condiciones iniciales de frontera físicas; esto consiste en dividir el dominio computacional en pequeñas celdas en forma de cuadriláteros, así como un número finito de nodos donde se calcularán variables de las ecuaciones de conservación de energía, masa y momentum mediante los solucionadores de OpenFOAM.

2.4 Solucionador

Se trabajará el solucionador interFOAM, ya que el caso de estudio se trata de un flujo multifase, isoterma e isotrópico que, además, incorporara ecuaciones de flujo turbulento y será analizado en estado estable. Como siguiente paso está la convergencia matemática, siendo esto el correr del modelo mediante solucionadores de OpenFOAM definiendo los esquemas de discretización y los límites de los residuos. La verificación de los resultados se visualizará en el *software* ParaView de posprocesamiento distribuido con OpenFOAM, será utilizado para verificación de la convergencia de la solución. Además, para la visualización de resultados de la solución de los diferentes campos. Se uso el *software* ParaView, que es totalmente compatible con OpenFOAM

2.5 Validación de las simulaciones

Después de todo lo correspondiente al *software* de CFD, prosigue el análisis y validación de datos. La validación de datos permite la comparación de los resultados que proporciona la simulación frente a los tomados en un canal abierto. Para esto, se

realizarán pruebas de laboratorio del canal, tomando los datos de velocidad, presión, y tirantes hidráulicos, estos datos reales se utilizarán en la validación, donde serán comparados con los datos que proporcione la simulación OpenFOAM.

Para este estudio se utilizaron métodos como error cuadrático medio (MSE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), error medio absoluto ponderado (MAPE) y error absoluto medio (MAE) por medio del *software* estadístico R para la comprobación de los datos.

3. Resultados y discusiones

En la tabla 1 se encuentran las dimensiones del canal y los valores de tirante, velocidad y presión experimentales que mostro el canal hidráulico de estudio, el cual opero con un caudal constante de 13L/s. En la figura 3, por otro lado, se presenta la explicación visual de la entrada y salida del sistema en consideración.

Tabla 1. Datos de laboratorio

Datos de laboratorio							
Características del canal			Distancia de la salida a la entrada de agua (cm)	Tirante (cm)	Velocidad (m/s)	Presión (mmH ₂ O)	Presión (kPa)
Caudal	13	l/s	112	3,5	0,96	56	0,342
Longitud	7,5	m	212	6	0,71	140	0,587
Ancho	32	cm	312	15,2	0,28	155	1,488
Alto	45	cm	512	16,2	0,24	166	1,585
Espesor	1	cm	662	17,2	0,23	168	1,683

Fuente: elaboración propia.

La construcción de un modelo CAD tridimensional del canal con reducción se muestra en la figura 4; este es el dato de entrada para definir el dominio físico bajo consideración. En este punto se recomienda eliminar la mayor cantidad de detalles de dibujo que generen irregularidades especialmente en las paredes de las geometrías.

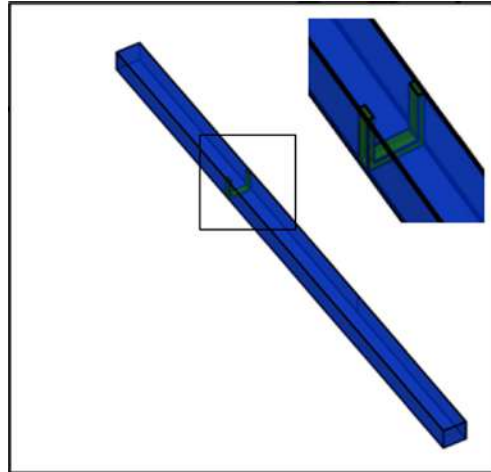


Figura 3. Modelo CAD tridimensional, con su respectivo detalle de la reducción mostrada en parte superior izquierda.

Fuente: elaboración propia.

El modelo CAD se ingresó al programa multiplataforma de acceso libre Blender, donde se definieron las condiciones geométricas de frontera del dominio de estudio. La cara donde se encuentra la entrada de agua (rojo) se llama "*inlet*", la salida de descarga del canal (azul) se establece como "*outlet*", las caras libres como la atmósfera "*atmosphere*" y, por último, las demás caras sólidas (gris) como las paredes se definieron como "*wall*" [23]. Posterior a definir las condiciones de frontera geométricas o caras, OpenFOAM requiere que se identifique dichas fronteras geométricas previas al Mallado en formato ".fms", tales como *wall* para la frontera "*wall*" y *patch* para los parches tales como: "*inlet*", "*outlet*" y "*atmosphere*", como se muestra en la figura 4.

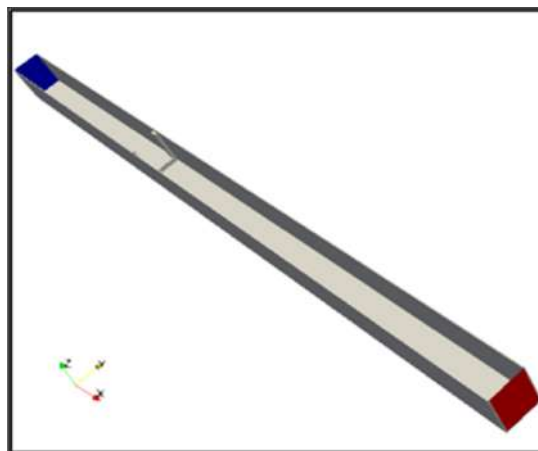


Figura 4. Condiciones de frontera geométrica obtenidas de Blender.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se realiza el mallado (o enmallado) del modelo. Esto es, el diseño de la red de volúmenes finitos en los que se discretiza el dominio para su posterior solución. Para esto, se crearon volúmenes finitos de 15 cm de ancho para las zonas centrales del modelo y refinamientos de 1 cm cerca de las paredes con cinco subdivisiones (boundaryLayers). Posteriormente, se creó la malla con el comando “cartesian-Mesh”. De donde se obtuvo una independencia de malla en aproximadamente 599.118 cubos debido al gran tamaño del canal (7 m de largo).

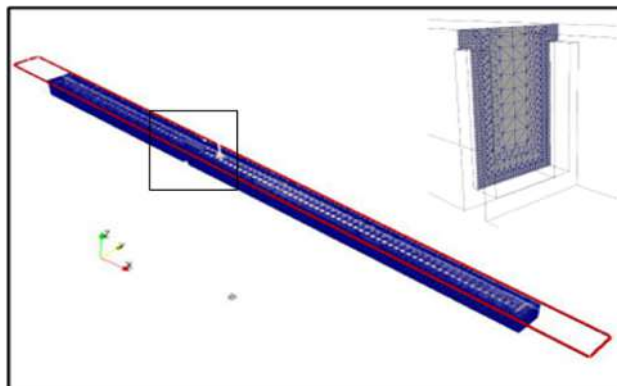


Figura 5. Creación del mallado para el dominio a discretizar en la carpeta “System”.

Fuente: elaboración propia.

También, se comprobó la calidad de la malla con el comando “checkMesh”, y se visualizó a continuación en el software de acceso libre ParaView por medio de la creación del archivo “dummy.foam”.

```
dimensions      [0 1 -1 0 0 0];
internalField    uniform (1 0 0);
boundaryField
{
    inlet
    {
        type      flowRateInletVelocity;
        volumetricFlowRate constant 0.013;
    }
    walls
    {
        type      noSlip;
    }
    atmosphere
    {
        type      pressureInletOutletVelocity;
        value      uniform (0 0 0);
    }
    outlet
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue uniform (0 0 0);
        value      $internalField;
    }
}
```

Figura 6. Mallado del modelo vista en ParaView, con detalle del enmallado de la reducción presentado en la parte superior izquierda.

Fuente: elaboración propia.

Posterior a definirle al programa las condiciones de frontera geométricas y contar con un dominio discretizado, se deben definir las condiciones de frontera numérica de dichas caras discretizadas. A continuación, en la figura 7, se presenta el ejemplo de condiciones de frontera para el campo de velocidades. Este proceso también se debe realizar para los campos de presión, relación gas-liquido "Alpha", tensión superficial "S", viscosidad de turbulencia "nut", energía turbulenta "k", y disipación de energía de turbulencia "Omega".

```
surfaceFile "Channel.fms";

minCellSize 0.15;

maxCellSize 0.15; //Anteriormente usaban 0.05

boundaryCellSize 0.15;

localRefinement
{
    "inlet.*"
    {
        cellSize 0.01;
    }
    "outlet.*"
    {
        cellSize 0.01;
    }
    "walls.*"
    {
        cellSize 0.01;
    }
    "atmosphere.*"
    {
        cellSize 0.01;
    }
}
```

Figura 7. Condiciones de frontera numérica para el campo de velocidades de OpenFOAM en la carpeta "0" (cero).

Fuente: elaboración propia.

En la figura 8, se muestran algunos detalles del solucionador, para los campos "Alpha" y "presión corregida" del solucionador interFoam, de los cuales se destaca la tolerancia para finalizado del proceso iterativo de cálculo del orden de 10^{-5} .

```

solvers
{
    "alpha.water.*"
    {
        nAlphaCorr      1;
        nAlphaSubCycles 1;
        cAlpha          1;

        MULESCorr      yes;
        nLimiterIter    3;

        solver          smoothSolver;
        smoother        symGaussSeidel;
        tolerance       1e-8;
        relTol          0;
    }

    "pcorr.*"
    {
        solver          PCG;
        preconditioner
        {
            preconditioner  GAMG;
            tolerance       1e-5;
            relTol          0;
            smoother        GaussSeidel;
        }
        tolerance       1e-5;
        relTol          0;
        maxIter         50;
    }
}

```

Figura 8. Detalles del solucionador interFoam para los campos “Alpha” y “Presión corregida” en la carpeta “System”.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 9 se puede apreciar que posterior a la iteración 4.500 (tiempo entendido como iteraciones) se logra la estabilización del modelo (a las 4,15 h de procesamiento) con mayor exactitud para el campo de presiones que el de las componentes de velocidad en “x”, “y”, y “z”. La componente de velocidades en z (sentido gravitacional) es el que presenta mayor variabilidad debido posiblemente a que es el eje en donde mayor se presenta la fuerza impulsora de deformación y movimiento del fluido que es la gravedad. En la figura 10 se parecía de manera similar que se el sistema se logra estabilizar posterior a la iteración 4.500 y en este caso los campos con mayor variabilidad son los de energía de turbulencia y el coeficiente “Alpha”, que relaciona las fases gas-liquido. En general se logró residuales del orden de 10^{-2} – 10^{-3} muy similares a los recomendados en [14] y aceptados para la exactitud de medición de los equipos del estudio.

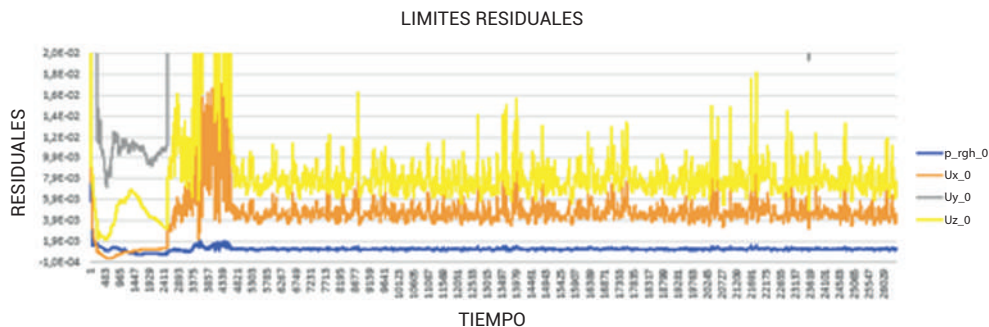


Figura 9. Límites residuales de la velocidad en x, y, z y la presión.

Fuente: elaboración propia.

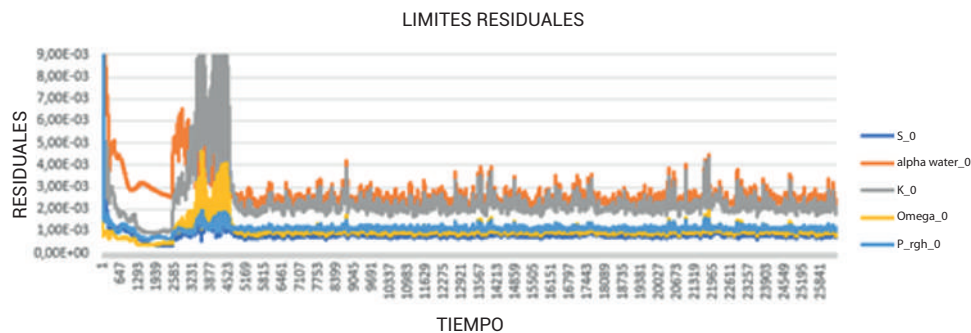


Figura 10. Límites residuales.

Fuente: elaboración propia.

En las figuras 11 y 12, se evidencia aguas arriba de la reducción una disminución de la magnitud de la velocidad y aumento de la presión y el tirante, mientras que aguas abajo de la reducción se presenta aumento de velocidad y disminución de la presión y tirante. Este fenómeno se debe al principio de continuidad o conservación de la masa donde se afirma que, si el caudal de un fluido es constante, pero la sección disminuye, la velocidad necesariamente aumenta para cumplir con la conservación. De la ecuación de Bernoulli, consecuencia de la teoría de conservación de la energía, se sabe que, si la energía cinética aumenta, la energía potencial a la cual está atada la presión debe necesariamente disminuir [13].

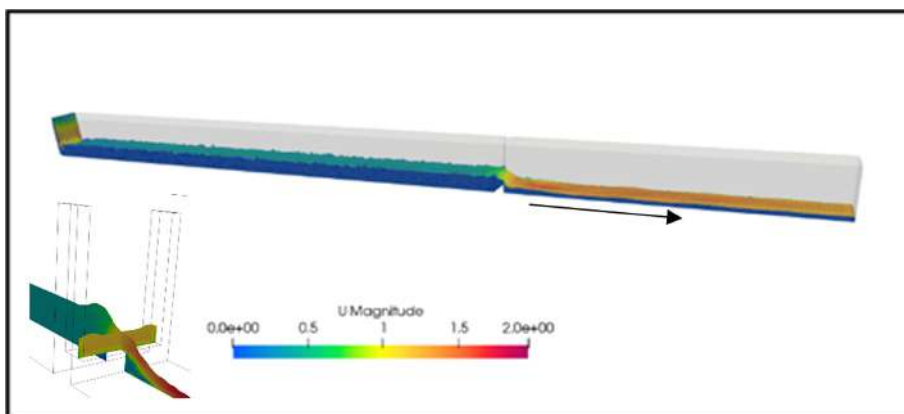


Figura 11. Vista en ParaView del campo de velocidad y detalle de velocidades de la reducción en la parte izquierda inferior.

Fuente: elaboración propia.

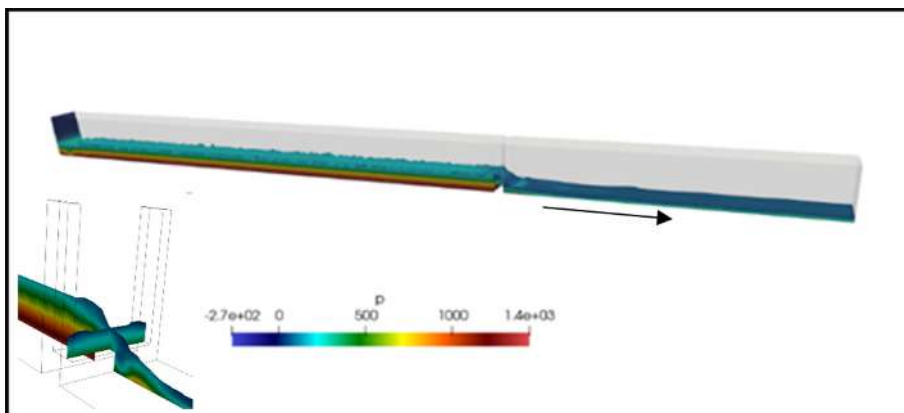


Figura 12. Vista en ParaView de la presión del agua en el canal y detalle de velocidades de la reducción en la parte izquierda inferior.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados de los valores de residuales encontrados en los datos experimentales de velocidad y los de la modelación matemática. Cabe resaltar que en la simulación se permite tener mayor control sobre los factores que inciden a los resultados debido a que estos factores son algoritmos predefinidos cuyos parámetros son previamente ingresados por el investigador. Sin embargo, los datos experimentales proporcionan respuestas dependiendo de factores que en muchas ocasiones son imposibles de controlar o contener totalmente. En general se encontró un error cuadrático medio elevado de 9 % y absoluto de 20 % para la verificación del campo de velocidades. En la figura 13 se puede ver el gran desfase que presentó.

Tabla 2. Métodos de error para resultados numéricos de datos tomados y datos modelados de la velocidad

	RMSE	MSE	MAPE	MAE
<i>Canal abierto con reducción</i>	0.311	0.097	0.412	0.205

Fuente: elaboración propia.

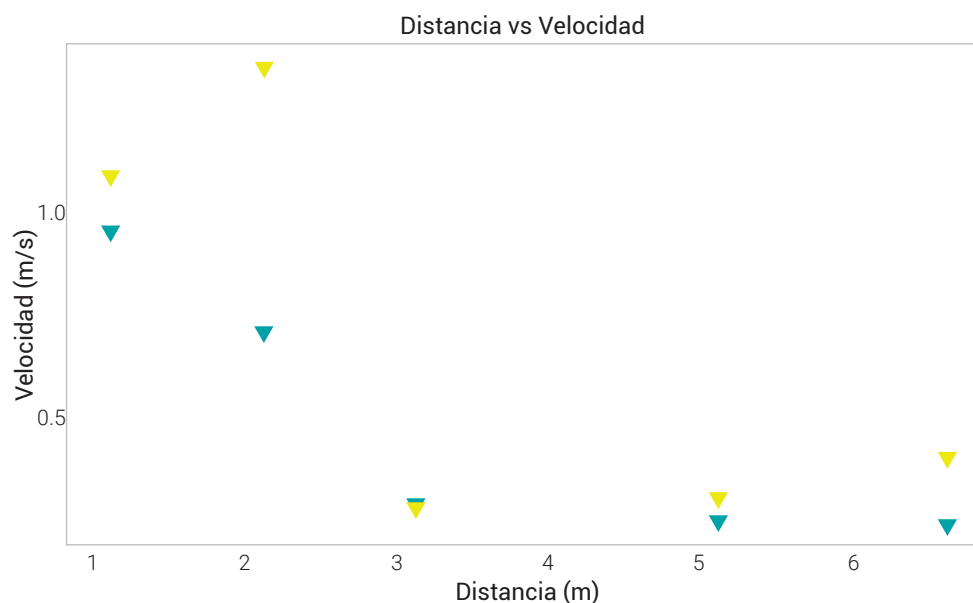


Figura 13. Gráfica de dispersión relacionando distancia desde la salida del canal versus la magnitud de la velocidad, para los datos experimentales (verde) y simulados (rojo).

Fuente: elaboración propia.

Por parte de la, validación matemática de las presiones del agua, en general se puede apreciar que hay un sesgo mucho mayor que el presentado en el campo de velocidades con un error cuadrático medio de 25 % y absoluto de 46 %.

Tabla 3. Métodos de error para resultados

	RMSE	MSE	MAPE	MAE
<i>Canal abierto con reducción</i>	0,509	0,259	0,419	0,461

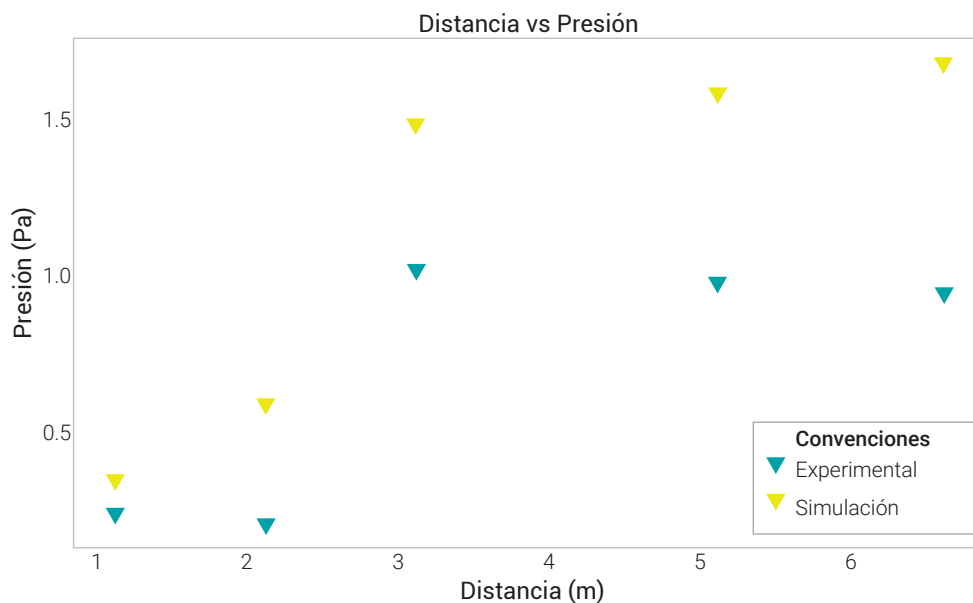


Figura 14. Gráfica de dispersión relacionando distancia desde la salida del canal versus la presión, para los datos experimentales (azul) y simulados (rojo).

Fuente: elaboración propia.

A pesar de que autores previos a esta investigación muestran un error aproximado del 4 % [5], la investigación muestra más del 40 % en el error absoluto medio (MAE). El porcentaje de error mayor al encontrado en la literatura se le atribuye a un error de instrumentación en los equipos del laboratorio, por lo cual se observó una fuga que generaba pérdida de presión y asimismo la imprecisión de los mismos instrumentos. Lo cual abre la posibilidad de futuros estudios con el fin de mejorar en la calidad de toma de datos para generar mejores predicciones de las unidades en consideración.

4. Impactos

Generar un interés sobre los *softwares* y la hidráulica en la comunidad académica para fomentar los procesos de formación en hidráulica, por medio del entendimiento de forma práctica y visual el comportamiento dinámico de los fluidos utilizando TIC para su aprendizaje. También, divulgación sobre las herramientas para gestionar un adecuado manejo de los recursos hídricos de la región, al implementar diferentes estrategias tecnológicas.

5. Conclusiones

Se logró la independencia de malla en aproximadamente 599.118 cuadriláteros, los cuales eran de 15 cm de ancho en las zonas centrales del canal y 1 cm cerca de las paredes con cinco subdivisiones de refinamiento. En la iteración 4.500 se logra la estabilización del modelo, a las 4,15 h de tiempo real de simulación, en general se logró residuales de 10^{-2} y 10^{-3} de orden de magnitud que soportan la validez teórica. El comportamiento de la presión y el tirante en el canal de reducción cambia de manera proporcional y estos a su vez son inversamente proporcionales a la velocidad tan y como se conocía por la literatura. Por otro lado, se encontraron porcentajes de error cuadrático absoluto superior al 40 % en la validación de las presiones, lo cual se les atribuye principalmente a errores de instrumentación en los equipos del laboratorio principalmente del canal.

6. Agradecimientos

Esta investigación se lleva a cabo gracias al apoyo de los proyectos Fodein multicampus de la Universidad Santo Tomás, a los participantes del Semillero de Investigación AquaViva, perteneciente al grupo de investigación Geo-amenaza e Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás –Villavicencio. También, se agradece a la comunidad de OpenFOAM por sus aportes, ayudas y soporte en la resolución de problemas en simulación, ya que sin el acceso a estos códigos nada sería posible.

Un agradecimiento especial a la memoria del doctor colombiano Gonzalo Pulido Silva, quien fue docente de la Universidad del Istmo en Panamá, por haber confiado en el nodo USTA – Villavicencio para hacer realidad una de sus últimas investigaciones en la simulación hidrodinámica de plantas de tratamiento de agua.

7. Referencias

- [1] A. Mohammadian, M. Heyrani, I. Nistor y O. Faruk, “Application of numerical and experimental modeling to improve the efficiency of parshall flumes: a review of the state-of-the-art”, *Hydrology*, vol. 9, n.º 2, pp. 1-27, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/hydrology9020026>
- [2] Organización de las Naciones Unidas, “Naciones Unidas, Colombia”, [En línea]. Disponible en: <https://colombia.un.org/es/sdgs>. [Último acceso: 22 Septiembre 2021].

- [3] M. Castro, J. Almeida, J. Ferrer y D. Díaz, “Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global”, *Ingeniería Solidaria*, vol. 10, n.º 17, pp. 111-124, 2014. doi: <https://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.811>
- [4] B. Wols, *Computational Fluid Dynamics in Drinking Water Treatment*, IWA Publishing, 2011.
- [5] F. Moukalled, L. Mangani y M. Darwish, *The Finite Volume Method In Computational Fluid*, New York: Springer International Publishing, 2016.
- [6] M. Heyrani, A. Mohammadian y I. Nistor, Numerical Simulation of Flow in Parshall Flume Using Selected Nonlinear Turbulence Models, *Hydrology*, vol. 8, n.º 4, 2021, pp. 1-15. doi: <https://10.3390/hydrology8040151>
- [7] H. Young y R. Freedman, *Física universitaria*, México: Pearson, 2013.
- [8] Technische Universität Wien Institute of Chemical, OpenFOAM, Basic Training, Berlin: Chemical Engineering, 2019.
- [9] C. Knatz, S. Rafferty y A. Delescinskis, “Optimization of water treatment plant flow distribution with CFD modeling of an influent channel”, *Water Quality Research Journal of Canada*, vol. 50, n.º 1, pp. 72-82., 2015. doi: <https://doi.org/10.2166/wqrjc.2014.024>
- [10] J. Muñoz-Barranco, “Evaluación de la eficiencia de métodos acoplados en la resolución de problemas fluidomecánicos con OpenFOAM”, tesis de pregrado, Universidad de Jaén, Jaén, España: 2015. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10953.1/3786>
- [11] E. Mattos, J. Flores, W. Ojeda, M. Iñiguez, C. Díaz y H. Salinas, “Hydraulic Analysis of a Compound Weir (Triangular - Rectangular) Simulated With Computational Fluid Dynamics (CFD)”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 12, n.º 4, pp. 112-162, 2021. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-04-03>
- [12] E. Mattos, J. Velásquez, W. Ojeda, M. Iñiguez y C. Díaz, “Hydraulic analysis of a compound weir (triangular-rectangular) simulated with computational fluid dynamics (CFD)”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 12, n.º 4, pp. 112-162, 2021. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-04-03>
- [13] G. Díaz, “Modelación mediante software CFD de los ensayos de vertedero rectangular y triangular del canal hidráulico del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Santo Tomás, Sede Villavicencio”, tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás, Villavicencio, Colombia: 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11634/29932>

- [14] P. Negrón, *Redes neuronales sigmoidal con algoritmo LM para pronóstico de tendencia del precio de las acciones del IPSA*, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile: 2014.
- [15] H. Imanian y A. Mohammadian, Numerical simulation of flow over ogee crested spillways under high hydraulic head ratio, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 13, United Kingdom: Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2019. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1661014>
- [16] L. Jiang, M. Diao, H. Sol y Y. Ren, “Numerical modeling of flow over a rectangular broad-crested weir with a sloped upstream face”, *Water*, vol. 10, n.º 11, pp. 1-12, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/w10111663>
- [17] M. Heyrani, A. Mohammadian, I. Nistor y O. Dursun, “Numerical modeling of venturi flume”, *Hydrology*, vol. 8, n.º 27, pp. 17, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/hydrology8010027>
- [18] TecQuipment, “7.5 Metre Flume”, [En línea]. Disponible en: <https://www.tecquipment.com/es/7-5-metre-flume-fc300>. [Último acceso: 31 10 2022].
- [19] Suplementos Industriales en Colombia, “Vía Industrial,» [En línea]. Disponible en: www.viaindustrial.com/medidor-de-flujo-de-mano-hach-fh-950-fh-950-hach/pp/P238104. [Último acceso: 31 10 2022].
- [20] D. Montgomery, “Design and Analysis of Experiments”, *John Wiley & Sons, Inc*, vol. 5, 1997.
- [21] L. Jiang, M. Diao, H. Sol y Y. Ren, “Numerical modeling of flow over a rectangular broad-crested weir with a sloped upstream face”. *Water*, vol. 10, n.º 11, pp. 1-12, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/w10111663>
- [22] T. Deshpande, Evaluación del Rendimiento del Solucionador de Flujo Bifásico InterFOAM, *Ciencia Computacional y Descubrimiento*, 2012.
- [23] W. M. Castellanos Guerrero y S. B. Chaves Pabón, “Efecto del envejecimiento de mezclas asfálticas en el ciclo de vida del pavimento desde el aspecto técnico y ambiental. Revisión del estado de conocimiento”, *Rev. Vínculos*, vol. 17, n.º 1, pp. 7-23, jun. 2020. doi: <https://doi.org/10.14483/2322939X.16227>
- [24] L. Cuenca, “Cálculo de la longitud mínima de aproximación para una canaleta Parshall a través de la comparación del comportamiento hidráulico entre un modelo numérico y un modelo físico”, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2019. <https://hdl.handle.net/10983/23663>