

CONVERGENCIA NUMÉRICA DE CANALETA PARSHALL PARA SIMULACIÓN DE
MEZCLA RÁPIDA CON DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS



MARTHA PATRICIA MONTENEGRO CARRILLO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2022

CONVERGENCIA NUMÉRICA DE CANALETA PARSHALL PARA SIMULACIÓN DE
MEZCLA RÁPIDA CON DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS

MARTHA PATRICIA MONTENEGRO CARRILLO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de pregrado en ingeniería civil

Asesor

ELÍAS DANIEL DAVID NOVA BURGOS

Ingeniero civil y sanitario

Jurado

JAVIER YESID MAHECHA NUÑEZ

Ingeniero civil

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2022

Autoridades Académicas

Fray José Gabriel Mesa Angulo, O.P

Rector General

Fray Eduardo Gonzáles Gil, O. P.

Vicerrector Académico General

Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O. P.

Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo García Jara, O. P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Julieth Andrea Sierra Tobón

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. Luis Fernando Díaz Cruz, MSc

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Nota de aceptación

Ing. Luis Fernando Díaz Cruz, MSc
Decano Facultad Ingeniería Civil

Ing. Elías Daniel David Nova Burgos
Tutor Universidad

Doc. Javier Yesid Mahecha Núñez
Evaluador

Este proyecto está dedicado a mi familia por su apoyo incondicional a lo largo del camino.

Agradecimientos

Esta investigación se lleva a cabo gracias al apoyo de los proyectos FODEIN multicampus de la Universidad Santo Tomás, al 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 al ingeniero Elías Daniel David Nova Burgos, quien me transmitió su pasión por la mecánica computacional de fluidos y compartió sus conocimientos sin los cuales hubiera sido muy complicado acercarse a la temática tratada, a todos los maestros involucrados en mi formación académica especialmente a los que me despertaron el amor por la hidráulica.

Contenido

	Pág.
1. Resumen	12
2. Abstract	13
1. Introducción	14
2. Formulación del Problema	16
3. Justificación	17
4. Objetivos (General y específicos)	18
4.1. General	18
4.2. Específicos	18
5. Marco de Referencia	19
5.1. Marco Teórico	19
5.1.1 Dinámica computacional de fluidos	20
5.1.2 Método de los volúmenes finitos	22
5.1.3 Ecuaciones de la conservación de la energía	24
5.1.4 Conservación de la masa	25
5.1.5 Conservación del momento	27
5.1.6 Ecuaciones de Navier-Stokes	27
5.1.7 Modelo de turbulencia K-omega SST	28
5.1.8 Fluidos multifase	30
5.1.9 Solucionador interFoam	30
5.1.10 Algoritmo PIMPLE	31

5.1.11	Canaleta Parshall y ecuaciones de Canaleta Parshall	32
5.1.12	Canal hidráulico para ensayos	33
5.1.13	OpenFOAM	34
5.1.14	Programa Blender	35
5.1.15	Programa ParaView	36
5.2.	Estado del Arte	36
6.	Metodología	39
6.1.	Etapa 1: Revisión de la literatura.	40
6.2.	Etapa 2. Definición Del Dominio Bajo Consideración	42
6.3.	Etapa 3. Discretización	44
6.4.	Etapa 4. Convergencia de la solución iterativa	44
6.5.	Etapa 5. Verificación de los resultados	45
7.	Resultados y Análisis	46
8.	Impactos	59
9.	Conclusiones	60
10.	Trabajos Futuros	61
11.	Anexo	61
12.	Referencias	63

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Dimensiones del canal hidráulico	46
Tabla 2 Impactos	59

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Vehículo Hyper-X en una condición de prueba Mach 7 con el motor en funcionamiento	21
Figura 2 Procesos modelación software CFD	21
Figura 3 Mallas superficiales coloreada por la razón de aspecto de la celda.	23
Figura 4 Canaleta de Parshall	32
Figura 5 Dimensiones para cada ancho de garganta	33
Figura 6 Canal Hidráulico de Ensayos	34
Figura 7 Metodología para el desarrollo.	39
Figura 8 Estructura del caso elbow.	41
Figura 9 Caso tutorial snappyHexMesh – Multi-Región.	42
Figura 10 Toma de dimensiones del canal hidráulico.	43
Figura 11 Dimensiones de la canaleta Parshall.	46
Figura 12 Modelo CAD tridimensional.	47
Figura 13 Condiciones de frontera geométricas.	48
Figura 14 Creación del mallado.	49
Figura 15 Mallado de la modelo vista en ParaView.	50
Figura 16 Detalle del mallado de la reducción de la canaleta presentado en ParaView	50
Figura 17 Condiciones de frontera numéricas.	51
Figura 18 Detalles del solucionador InterFoam.	52
Figura 19 Descripción del comportamiento de la velocidad.	53
Figura 20 Velocidad vista ParaView.	54
Figura 21 Presión vista en ParaView.	54
Figura 22 Relación gas-líquido “Alpha” vista en ParaView.	55
Figura 23 Energía de turbulencia "K" vista en ParaView.	56
Figura 24 Disipación de energía de turbulencia “Omega” vista de ParaView.	57
Figura 25 Viscosidad de turbulencia “nut” vista de ParaView.	58
Figura 26 Tensión superficial “S” vista en ParaView.	58

Lista de Ecuaciones

Pág.

Ecuación 1 Ecuaciones de conservación de la energía en un sistema.	24
Ecuación 2 Conservación de la energía dentro de la dinámica computacional de fluidos	25
Ecuación 3 La ley de conservación de la masa (en forma diferencial)	26
Ecuación 4 Conservación de la masa en fluidos incompresibles.	26
Ecuación 5 Conservación del momentum de Cauchy.	27
Ecuación 6 Ecuaciones de Navier-Stokes.	28
Ecuación 7 Modelo de turbulencia K-omega SST.	29

1. Resumen

Este documento tiene como finalidad mostrar la convergencia numérica de canaleta Parshall para la simulación de la unidad de mezcla rápida necesaria en las plantas de tratamiento de agua potable. Los sistemas de tratamiento incluyen una serie de procesos como lo es la coagulación, para que esta se realice de manera eficiente depende de la mezcla rápida que puede realizarse aprovechando la turbulencia provocada por dispositivos hidráulicos como la canaleta Parshall. Para llevar a cabo la optimización de las unidades de mezcla rápida se debe simular el flujo que pasa por la canaleta por medio de la estabilización de las variables que necesitará el modelo computacional. Mediante la construcción de un modelo CAD tridimensional de la canaleta ingresado como dato de entrada al software OpenFOAM, se definirá el dominio físico bajo consideración en formato. stl. Con esto establecido, se desarrolla el correcto mallado del modelo, lo que contempla el diseño de la red de volúmenes finitos en los que se discretiza el dominio, y posteriormente dar solución de ecuaciones de Euler para fluidos viscosos y de Navier Stokes mediante los solucionadores de OpenFOAM. Posterior a la convergencia del modelo numérico de la canaleta Parshall, se continúa analizando los diferentes campos de velocidad, presión, turbulencia y disipación de energía de turbulencia, que permitirán mejorar el entendimiento de los fenómenos hidráulicos presentes en la unidad simulada. En este estudio de simulación con un caudal de 13 l/s, se logra la convergencia de la solución iterativa en la iteración 24401 donde se estabiliza el modelo CFD, logrando residuales de 10^{-2} 10^{-3} de orden de magnitud, aceptados en la literatura para establecer que hay una convergencia matemática.

Palabras Clave: CFD, volúmenes finitos, Simulation, convergencia, OpenFOAM, canal Parshall.

2. Abstract

The purpose of this paper is to show the numerical convergence of Parshall flume for the simulation of the rapid mixing required in drinking water treatment plants. The treatment systems include a series of processes such as coagulation, and for this to be carried out efficiently, it depends on the rapid mixing that can be performed by taking advantage of the turbulence caused by hydraulic devices such as the Parshall flume. To carry out the optimization of the rapid mixing units, the flow through the flume must be simulated by stabilizing the variables that the computational model will need. By means of the construction of a three-dimensional CAD model of the flume entered as input data to the OpenFOAM software, the physical domain under consideration will be defined in .stl format. With this established, the correct meshing of the model is developed, which contemplates the design of the finite volume network in which the domain is discretized, and then the solution of Euler equations for viscous fluids and Navier Stokes equations by means of OpenFOAM solvers. After the convergence of the numerical model of the Parshall flume, the different fields of velocity, pressure, turbulence and turbulence energy dissipation continue to be analysed, which will improve the understanding of the hydraulic phenomena present in the fast-mixing unit. In this simulation study with a flow of 13 l/s, the convergence of the iterative solution was achieved in iteration 24401 where the CFD model is stabilized, achieving residuals of 10^{-2} 10^{-3} of order of magnitude, accepted in the literature to establish that there is a mathematical convergence.

Key Word- CFD, finite volumes, Simulation, convergence, OpenFOAM, Parshall flume.

1. Introducción

La mecánica de fluidos investiga y desarrolla modelos matemáticos que logren describir la forma en la que se comportan los fluidos, a partir del avance de las tecnologías se han podido utilizar en gran medida algunos *softwares* como OpenFOAM, que permiten realizar la búsqueda de soluciones a este tipo de modelos, con el apoyo del cálculo computacional en observancia y comprobación de los comportamientos físicos dinámicos de los fluidos. La dinámica computacional de fluidos, más conocidas por las siglas en inglés CFD (Computational Fluid Dynamics), logra moderar parámetros hidráulicos dentro de los cuales se encuentra la velocidad, la presión, lámina de agua, entre otros de acuerdo al caso de estudio, lo cual se lleva a cabo a partir de la integración de ecuaciones de Euler para fluido viscoso y Navier-Stokes en cuanto a las ecuaciones de conservación de la energía, la masa y el momentum; OpenFOAM, permite el uso de solucionadores en cuanto al lenguaje de programación C++, con el fin de resolver dichas ecuaciones que se ponen en contexto de forma precedente, en este mismo sentido, este *Software* hace uso de un método tensorial y de métodos basados en volúmenes finitos, los cuales son ampliamente explicados en Moukalled et al., (2016).

CFD usa discretización del dominio de control por medio del método de los volúmenes finitos, el cual es la división del dominio en pequeños volúmenes de control (Moukalled et al., 2016). Proporcionar una malla que no tenga fallas en términos de superposición, huecos o ángulos agudos ya que esto afecta la veracidad de los resultados, además de implantar el tamaño de malla correcto, es decir, la malla más cercana al tamaño de cuadrícula óptimo, ya que permite a la simulación producir los resultados más cercanos a los datos reales, es decir, resultados experimentales, con un coste computacional óptimo (Mohammadian et al., 2021). Las soluciones de simulación numérica directa demandan mallas tridimensionales muy finas, computadoras grandes y una enorme cantidad de tiempo del CPU (Unidad Central de Procesos) que permitan simplificar, con el fin de simular campos complejos de flujo turbulento con número de Reynolds alto (Giraldo Vivas, 2017). Debido a esto es fundamental tener en cuenta la selección del número de puntos en los que se desea realizar el cálculo, ya que el aumento o disminución de estos afecta la variación del tiempo de ejecución y desperdicio de recursos computacionales.

Ahora bien, para lograr determinar el tamaño óptimo de la malla, se hace uso de una malla estructurada, así como de un análisis de la sensibilidad de la misma malla, la finalidad de dicho análisis, consiste en encontrar el tamaño de una malla mucho más fina, con la cual no se afecten los resultados, puesto que, en la medida que la malla de tamaño grueso original se vuelve mucho más fina, los niveles de agua que se simulan, se acercan aún más a los valores de los datos experimentales. (Heyrani et al., 2021) llevaron a cabo un estudio, a partir del cual el número inicial de celdas era de 52.000, de las cuales se aumentaron de forma gradual a 74.496, y posteriormente, a 263.700; en este sentido, en el marco de los resultados de las dos últimas mallas finas, no se encontraron en los registros cambios drásticos o significativos en la calidad de los datos simulados, es por ello que, no fue recomendable aumentar el número de células luego de 74.496 para los modelos de turbulencia analizados. Por parte del solucionador se debe tener en cuenta tanto el tipo de solucionador como el análisis de su convergencia. El grupo *Multiphase* permite la solución de simulaciones donde el flujo es simultáneo de materiales en diferentes fases, puede haber múltiples componentes presentes en cada fase, en este caso los flujos multifásicos como gas-líquido, es decir, Aire-Agua.

. Para estudiar el comportamiento de la solución iterativa en la simulación de un canal Parshall, se utilizó el solucionador del grupo *Multiphase* interFoam ya que resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para dos fluidos inmiscibles isotérmicos e incompresibles y se basa en el enfoque de volumen de fluido (VOF) (Haddadi et al., 2019). Por otro lado, como cualquier solución iterativa se necesita verificar su veracidad, para esto se revisan los límites residuales (Moukalled et al., 2016). 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 $10^{-3} - 10^{-4}$ y dependiendo también del campo de estudio y de la exactitud de los equipos de medida del laboratorio (Muñoz Barranco, 2015).

El desarrollo de este trabajo de investigación tiene como finalidad comprobar la convergencia de la solución iterativa de canaleta Parshall para simulación de mezcla rápida con dinámica computacional de fluidos, por medio de la representación tridimensional de objetos y la discretización del dominio de modelación. Tras llevar a cabo la correcta modelación, obtención e interpretación de los resultados de los campos simulados, se realiza un análisis de los límites residuales para concluir si hubo o no convergencia de la solución iterativa.

2. Formulación del Problema

En Colombia veinticuatro de veintisiete departamentos cuentan con un Índice de Riesgo para la Calidad del Agua Potable (IRCA) medio y tres con un IRCA alto, donde el departamento del Meta es uno de estos tres altos (Carrasco Mantilla, 2016). Por esta razón se debe ampliar la cobertura de los servicios públicos y el número de sistemas de tratamiento de agua potable en el departamento, las zonas rurales, los pequeños municipios y la periferia de las grandes ciudades para que Colombia logre las metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en especial con el sexto objetivo del desarrollo sostenible sobre agua limpia y saneamiento.

Los sistemas de tratamiento de agua potable incluyen una serie de procesos para obtener agua apta para el consumo humano, incluida la coagulación, donde se inicia la clarificación a partir de la aplicación de productos químicos coagulantes. Una coagulación eficiente depende de la mezcla rápida que puede realizarse aprovechando la turbulencia provocada por dispositivos hidráulicos como la canaleta Parshall, una modificación del canal Venturi, desarrollado por Ralph L. Parshall en la década de 1930 (Mohammadian et al., 2021). La canaleta Parshall se usa normalmente con la doble finalidad: de medir el caudal afluente y realizar la mezcla rápida debido al flujo supercrítico producido en la zona de la garganta, también conocido como resalto hidráulico. Los diferentes diseños de la canaleta y diferentes caudales de entrada a la planta de tratamientos pueden dañar el proceso y dejar residuos en el agua potable que afecten la salud humana, como sulfato, aluminio, hierro, cloruros, etc., así como el costo económico por la pérdida de productos químicos valiosos (Espinosa Salgado & Gaitan Olano, 2018). Los tamaños disponibles para las canales Parshall son limitados esto reduce la confiabilidad en la medida de diferentes parámetros hidráulicos como el tirante, la velocidad y presión de los modelos, ya que los fabricantes tienden a modificar las especificaciones originales proporcionadas por Parshall para crear un canal de tamaño personalizado, para esto se deben realizar muchos experimentos de laboratorio que consumen tiempo y recursos garantizando la precisión del caudal dentro del dispositivo.

Las simulaciones asistidas por ordenador son una herramienta esencial en el diseño y optimización de sistemas hidráulicos. El uso de un modelo CFD puede optimizar significativamente el proceso (Heyrani et al., 2021).

3. Justificación

Este proyecto de investigación aportará conocimientos institucionales que puedan ser aplicados para proporcionar avances en los Objetivo de Desarrollo Sostenible, específicamente, el sexto que habla sobre agua limpia y saneamiento; Se obtuvo avances en el marco de modelación matemática de la canaleta Parshall, para estudiar el impacto de modificaciones propuestas en la eficacia de la mezcla. También aporta al fortalecimiento institucional en el uso de OpenFOAM para la modelación de problemas complejos en Recursos Hidráulicos. El proyecto proporciona avances en la optimización de los procesos de potabilización, incluyendo el aumento de laproducción de agua potable, el mejoramiento de la calidad de agua entregada a las comunidades y la reducción de costos de producción de agua potable. contribuirá fuertemente la posibilidad de utilizar la simulación CFD como un método fiable y solución rentable para una variedad de diferentes proyectos hidráulicos. Los software CFD son un elemento clave para mejorar los diseños comunes que se utilizan y aprueban por autoridades diferentes.

4. Objetivos (General y específicos)

4.1. General

Configurar matemáticamente la canaleta Parshall por medio de la representación tridimensional de objetos y la discretización del dominio de modelación.

4.2. Específicos

- Construcción de un modelo CAD tridimensional de la canaleta, que pueda ser ingresado como dato de entrada al software OpenFOAM, para definir el dominio físico bajo consideración.
- Crear una correcta discretización del modelo y definir las condiciones iniciales de frontera que ocurren en la superficie del dominio bajo consideración
- Comprobar la convergencia de la solución iterativa de la canaleta Parshall mediante la simulación en OpenFOAM, teniendo en cuenta los esquemas de discretización y límites residuales para dar solución de las ecuaciones de conservación.

5. Marco de Referencia

5.1. Marco teórico

Dentro de la dinámica computacional de fluidos, más conocida por sus siglas en inglés CFD, corresponde al área encargada de la modelación numérica de parámetros hidráulicos dados como, por ejemplo, la velocidad, la presión y lámina de agua, la transferencia de calor a través de la integración de aquellas ecuaciones de Euler orientadas a fluidos viscosos y Navier-Stokes en cuanto a la conservación de la energía, masa y el momentum (Anderson Jr, 1995).

De tal modo, OpenFOAM es un *Software* CFD que no tiene costo alguno y asimismo es de código, usando solucionadores para el lenguaje de programación C++, que manejan la malla y permiten el acceso a datos específicos, para resolver las ecuaciones que se indican de forma precedente. Por tanto, el Software hace uso de un mecanismo tensorial, así como de métodos y volúmenes finitos, que pueden revisarse, según Moukalled et al. (2016).

Los CFD discretizan el dominio de control usando el método de volumen finito, dividiendo el dominio en pequeños volúmenes de control (Moukalled et al., 2016). Para resultado más cercano a los datos reales tomados del laboratorio, la malla debe estar libre de defectos en términos de superposición, espacio o ángulos agudos, adicional a esto se debe implementar el tamaño de malla correcto que permita simulaciones con un costo computacional óptimo. (Mohammadian et al., 2021). Las soluciones de simulación numérica directa requieren mallas 3D muy finas, computadoras grandes y un tiempo de CPU significativo para simplificar campos turbulentos complejos de alto número de Reynolds (Julca Orrillo & Terrones Estrada, 2020).

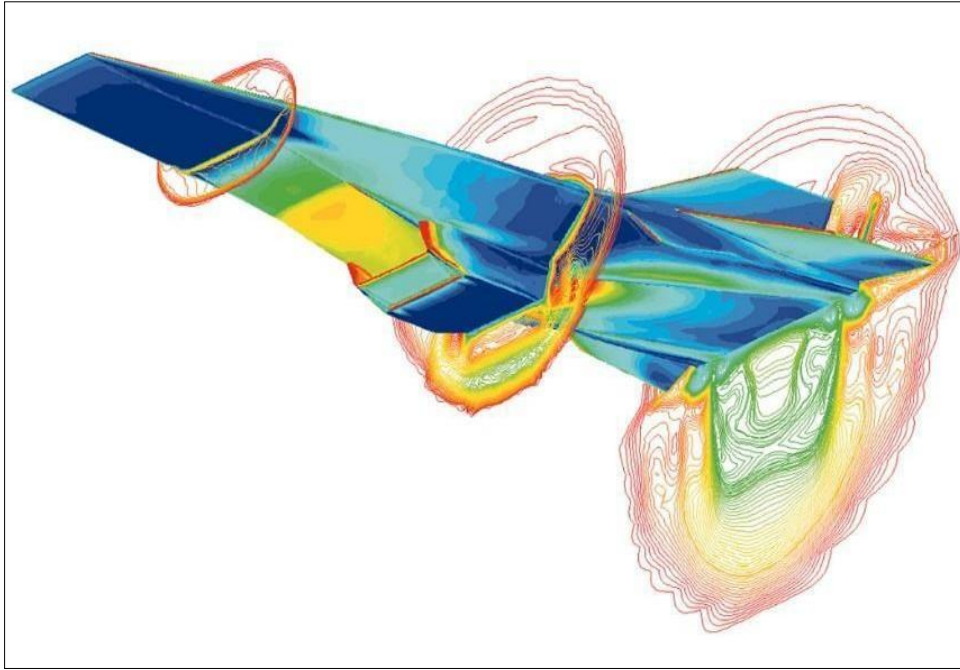
5.1.1 *Dinámica computacional de fluidos*

La Dinámica de Fluidos Computacional se basa en la solución numérica de las ecuaciones fundamentales por tres principios fundamentales, conservación de materia, energía y cantidad de movimiento en un dominio discretizado dado (geometría). Estos principios físicos se pueden expresar en términos de ecuaciones matemáticas básicas, que en su forma más general son ecuaciones integrales o ecuaciones diferenciales parciales. La dinámica computacional de fluidos reemplaza las integrales o las derivadas parciales (según sea el caso) en ecuaciones con formas algebraicas discretizadas, que a su vez se resuelven para obtener números para valores de flujo de campo en puntos discretos en el tiempo y/o el espacio. El resultado final de los CFD (Computational Fluid Dynamics) es un conjunto de números o campos, es decir, una descripción cuantitativa del sistema (Anderson Jr, 1995).

Los modelos CFD son capaces de proporcionar soluciones para las ecuaciones de flujo o describir el comportamiento de un fluido cuando interactúa con límites rígidos u obstáculos a lo largo de su camino. Mientras que las ecuaciones de se deriva el sistema de ecuaciones Navier-Stokes para fluidos viscosos (Heyrani et al., 2021). La dinámica computacional de flujos analiza sistemas que involucran fenómenos relacionados, como el flujo de fluidos, la transferencia de calor y las reacciones químicas, utilizando la simulación asistida por computadora sin la necesidad de tener ningún conocimiento práctico de la física involucrada (Moukalled et al., 2016).

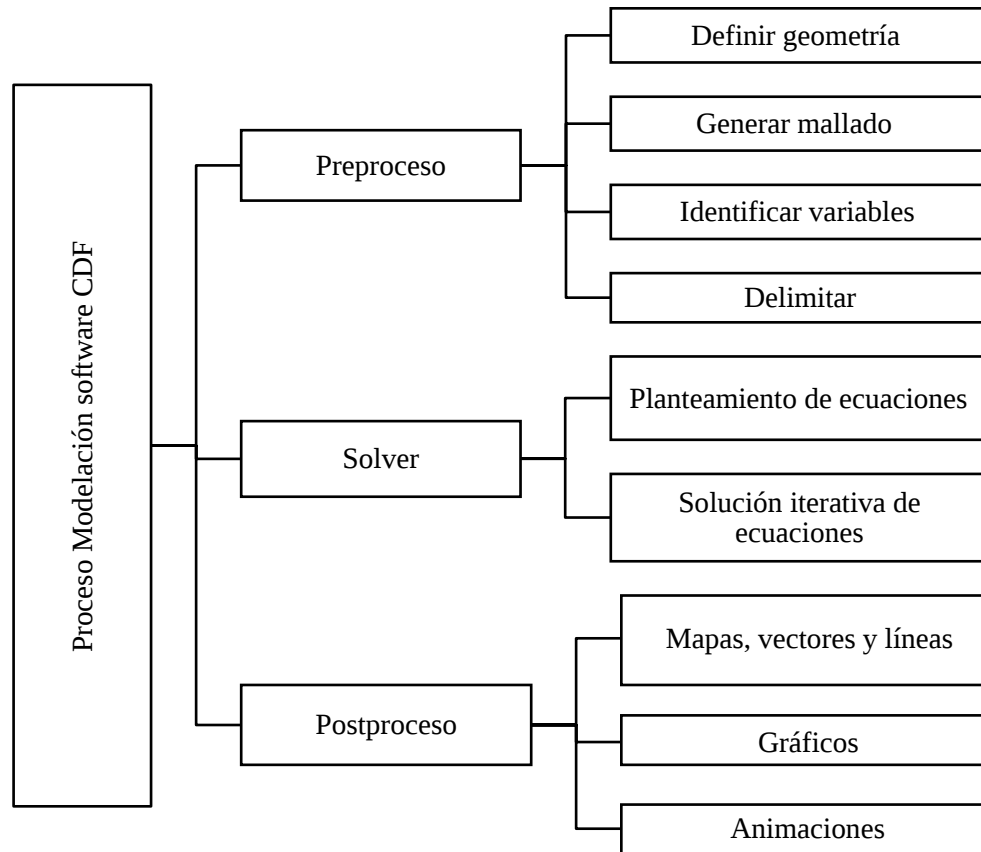
La dinámica computacional de fluido es un área de conocimiento muy poderosa y sus aplicaciones cubren una amplia gama de campos industriales y no industriales, Actualmente, la dinámica de fluidos computacional tiene demanda tanto en la ciencia como en la industria. La capacidad de ejecutar múltiples pruebas con poca o ninguna configuración complicada, peligrosa o costosa son algunos de los beneficios que tiene los modelos de CFD. Del mismo modo, la industrias como la aeroespacial, militar y automotriz realizan modelos aerodinámicos de automóviles, misiles, aviones y más, se ha beneficiado enormemente de CFD, tal como se muestra en la Figura 1. Por supuesto, en la industria de la construcción se utilizan para modelar elementos que transportan fluidos, como redes de agua, gasoductos, oleoductos y alcantarillas.

Figura 1 Vehículo *Hyper-X* en una condición de prueba Mach 7 con el motor en funcionamiento



Nota. Esta imagen de dinámica de fluidos computacional (CFD) muestra la transferencia de calor superficial en la superficie del vehículo (el rojo es el calentamiento más alto) y los contornos del campo de flujo en el número de Mach local de un vehículo HyperX. Adaptado de (NASA, 1997)

El desarrollo de un modelo en el software CFD tiene un proceso general y continuo para todos los modelos que se pueden generar. La primera parte se conoce como "preprocesamiento" donde se establecen las condiciones de contorno del modelado. La geometría de los sólidos a través de mallas, variables a analizar, es decir, definir el dominio bajo consideración. El segundo es el "solver", donde se plantea un modelo matemático propuesto y se resuelve mediante algoritmos e iteraciones hasta alcanzar los límites establecidos en el paso anterior. Finalmente, está el "postprocesamiento" donde se muestran los resultados. Inicialmente es una matriz, pero se puede graficar como una función del tiempo usando variables establecidas (Díaz Alarcón, 2020).

Figura 2*Procesos modelación software CFD.*

Nota. Adaptado de (Díaz Alarcón, 2020)

5.1.2 Método de los volúmenes finitos

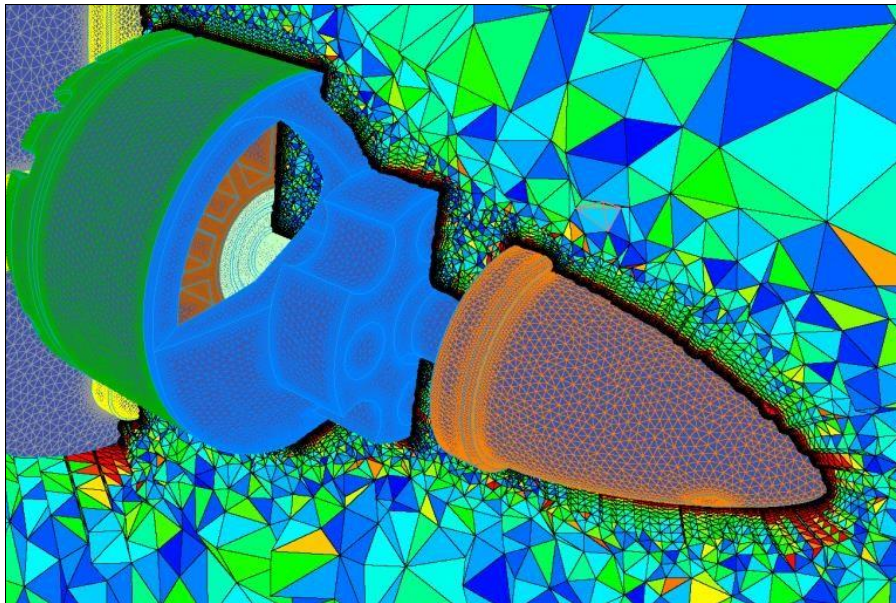
Los métodos de los volúmenes finitos, según Osses, (2016) son aquellas resoluciones analíticas de las ecuaciones de Navier-Stokes que se han desarrollado únicamente para flujos en geometrías primordiales y bajo condiciones ideales, debido a esto último, la implementación de procedimientos numéricos para solucionar flujos reales en geometrías complicadas se ha hecho indispensable. El procedimiento de volúmenes finitos (Finite Volume Method – FVM por su abreviatura en inglés) ha sido introducido en la década de 1970 por McDonald, MacCormack, y Paullay e históricamente fue procedimiento preferido por los científicos e ingenieros que trabajan con la mecánica de fluidos. Si bien en la última década el procedimiento de recursos finitos (FEM)

ha tenido relevantes adelantos para lograr solucionar exitosamente los retos de la mecánica de fluidos, aún para inconvenientes complicados involucrados a flujos multifásicos, reactivos, o poderosamente turbulentos, el procedimiento de volúmenes finitos es en la práctica la exclusiva solución (Moukalled et al., 2016).

Como aspectos generales, una de las propiedades de FVM, es que los inicios de conservación (masa, momentum y energía), los cuales son la base de la modelación matemática para la mecánica del constante, por definición, son respetadas por las ecuaciones discretas deducidas por el procedimiento de volúmenes finitos.

Figura 3

Mallas superficiales coloreada por la razón de aspecto de la celda.



Nota: Adaptado (Osses, 2016)

El punto de inicio del procedimiento de volúmenes finitos es la descomposición del dominio en pequeños volúmenes de control (VCs) donde las cambiantes son almacenadas en los nodos. Comúnmente, los volúmenes de control y los nodos son definidos con una grilla numérica, la malla Figura 3. Los nodos, donde se tienen las cambiantes a solucionar, se encuentran en los vértices de esta malla o en los centros de los volúmenes, y es la alusión con la que se cuenta para acercar la

solución en lo demás del dominio. Luego de haber determinado los VCs, las ecuaciones de conservación son descritas en su forma integral para cada volumen. En este proceso el teorema de la divergencia de Gauss es utilizado para cambiar integrales de volumen sobre operadores de divergencia y gradiente a integrales de área (Osses, 2016).

5.1.3 Ecuaciones de la conservación de la energía

En física, el concepto conservación tiene relación con algo que no cambia. Esto quiere decir que la variable en una ecuación que representa una porción conservativa es constante en la era. Tiene el mismo costo anteriormente y luego de un acontecimiento. No obstante, en problemas de mecánica, es probable que encuentres sistemas que contienen energía cinética (E_k), energía potencial elástica (U_s) y calor (energía térmica) (E_H). Ahora bien, para resolver estos problemas, a menudo comenzamos por establecer la conservación de la energía en un sistema entre un tiempo inicial (subíndice i) y un tiempo posterior (subíndice f) Como se muestra en la Ecuación 1.

Ecuación 1

Ecuaciones de conservación de la energía en un sistema

$$E_{Ki} + U_{gi} + U_{si} = E_{Kf} + U_{gf} + U_{sf} + E_{Hf}$$

Que podemos desarrollar como:

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + mgh_i + \frac{1}{2}kx_i^2 = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgh_f + \frac{1}{2}kx_f^2 + E_{Hf}$$

Nota: Adaptado de Villamizar Hernández, 2014.

De tal modo, en la física, se encuentra una especie de sistema que es el sufijo que le proveemos a una recolección de objetos que deseamos modelar con nuestras propias ecuaciones. Si vamos a explicar el desplazamiento de un objeto por medio de la conservación de la energía, entonces el sistema debería integrar el objeto de interés y todos los demás objetos con los que interactúa (Villamizar Hernández, 2014). En la primera ley de la termodinámica, pero con la

premisa de que no se consideran los efectos viscosos, se establece que los efectos de conservación de la energía, dentro de la dinámica de fluidos computacional, se pueden considerar como:

Ecuación 2

Conservación de la energía dentro de la dinámica computacional de fluidos

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{\partial p}{\partial t} + \Phi$$

Nota: Adaptado (Díaz Alarcón, 2020).

Donde se considera ρC_p como el calor específico y las derivadas parciales en función de las de la conductividad térmica k , adicionando una función de disipación Φ . Es importante establecer que en esta aplicación la temperatura es constante. (Díaz Alarcón, 2020)

5.1.4 Conservación de la masa

La ley de conservación de la masa es que, en un sistema cerrado o apartado, la materia no puede crearse ni destruirse. Puede modificar de manera sin embargo se preserva. En el entorno del análisis de la química, la ley de conservación de la masa plantea que, en un cambio químico, la masa de los productos es igual a la masa de los reactivos. Para poner en claro: Un sistema apartado es ese que no interactúa con su ámbito. Por consiguiente, la masa contenida en aquel sistema apartado permanecerá constante, independientemente de las transformaciones o actitudes químicas que ocurran, si bien el resultado podría ser distinto al que poseía inicialmente, no habrá más o menos masa que la que poseía. poseía previo a la transformación o actitud.

La ley de conservación de la masa es una ecuación de continuidad, lo que significa que se expresa como una igualdad entre la velocidad de cambio de una propiedad ϕ definida en un volumen arbitrario Ω y la cantidad que atraviesa la frontera de Ω más la que se crea o consume en las fuentes y sumideros del campo. En el caso de la función densidad, no existe este último término, pues la masa del fluido no se crea ni se destruye. Por tanto, al hacer $\phi = \rho$, obtenemos la ley de conservación de la masa (en forma diferencial) (Álvarez López, 2021).

Ecuación 3*La ley de conservación de la masa (en forma diferencial)*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

Nota: Adaptado (Álvarez, 2021)

Esta ecuación relaciona que la variación de la densidad en única relación al tiempo más el gradiente de la velocidad es cero, es decir, mantiene la invariabilidad másica. La mencionada ecuación refiere variaciones de densidad no aplicables a los fluidos no compresibles, como es el caso del agua, por lo que obviando dicho factor tenemos (Díaz Alarcón, 2020):

Ecuación 4*Conservación de la masa en fluidos incompresibles*

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

Nota: Adaptado (Álvarez López, 2021)

La ley de conservación de la masa ha sido determinante para el desarrollo de la química, debido a que ayudó a los científicos a entender que las sustancias no desaparecían como consecuencia de una actitud (como podría parecer); más bien, se convierten en otra sustancia de igual masa. La historia atribuye a diversos científicos el hallazgo de la ley de conservación de la masa. El científico ruso Mikhail Lomonosov lo anotó en su diario como consecuencia de un experimento realizado en 1756. En 1774, el químico francés Antoine Lavoisier documentó minuciosamente los experimentos que probaron la ley. La ley de conservación de la masa es famosa por ciertos como Ley de Lavoisier. Al conceptualizar la ley, Lavoisier aseguró: "Los átomos de un objeto no tienen la posibilidad de crearse ni destruirse, empero tienen la posibilidad de desplazarse y convertirse en diferentes partículas" (Helmenstine, 2019).

5.1.5 Conservación del momento

En cuanto a la conservación del momento, se encuentra que el concepto de conservación tiene relación con algo que no cambia. Esto quiere decir que la variable en una ecuación que representa una porción conservativa es constante en la época. Tiene el mismo costo anteriormente y luego de un acontecimiento. Hay muchas porciones conservativas en física. Comúnmente resultan muy útiles para hacer predicciones en lo cual de lo opuesto podrían ser situaciones bastante complejas. En mecánica, hay 3 porciones primordiales que se conservan. Estas son el instante, la energía y el instante angular. La conservación del instante se utiliza más para explicar colisiones entre objetos (Cengel & Cimbala, 2012).

La ecuación de momentum de Cauchy. El termino r_{ij} hace referencia, como se mencionaba, al esfuerzo cortante, y es ahí donde la aplicación de la ecuación de momentum de Cauchy se puede relacionar de manera directa con los fluidos incompresibles, donde el esfuerzo cortante se tiene como:

Ecuación 5

Conservación del momentum de Cauchy

$$r_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu e_{ij}$$

Nota: Adaptado (Cengel & Cimbala, 2012)

Corresponde a la ley de Stokes aplicada a los fluidos incompresibles, donde se define la presión mecánica y la viscosidad del fluido, es decir, el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante por viscosidad (Cengel & Cimbala, 2012).

5.1.6 Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones Navier-Stokes son, en conjunto, el sistema que describe el comportamiento del flujo. Estas ecuaciones no son más que la aplicación de los principios de conservación de masa, desplazamiento y energía a un fluido. Son tan relevantes ya que su resolución implicaría un entendimiento absoluto de cómo un fluido se va a desplazar partiendo de unas condiciones iniciales

y un enorme uso que se le podría ofrecer es el de ejemplificando ofrecer previsiones meteorológicas precisas (Yep, 2021).

No obstante, el desplazamiento de un fluido es tan caótico que las ecuaciones adquieren una gigantesca dificultad en su resolución y solamente tienen la posibilidad de resolverse numéricamente o analíticamente mediante muchas simplificaciones e idealizaciones del fluido (Álvarez López, 2021). Como se ha establecido, en la dinámica para fluidos incompresibles, existen relaciones directas a las leyes generales que rigen los sistemas dinámicos, con la inclusión de los determinantes de esfuerzos cortantes correspondientes, para el caso la viscosidad. A partir de las ecuaciones de Euler, que son deducciones de las leyes de Newton (Díaz Alarcón, 2020), los físicos Claude Navier y George Stokes modelaron dichas ecuaciones incluyendo las condiciones viscosas en el transporte másico de fluidos incompresibles, dando lugar a la serie de ecuaciones de Navier-Stokes:

Ecuación 6

Ecuaciones de Navier-Stokes

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (v) &= 0 \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(v * \nabla)v &= -\nabla p + \rho g + \nabla * r_{ij} \\ E \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla * (vE) &= \nabla * (k \nabla T) + PG + \nabla * (\sigma * v) + W_f + q_H \end{aligned}$$

Nota: Adaptado (Álvarez López, 2021)

De dicho sistema de ecuaciones relacionadas no es posible obtener una solución analíticamente. Por esto, se hace necesario establecer una solución al sistema de ecuaciones a partir de algoritmos (Moukalled et al., 2016).

5.1.7 Modelo de turbulencia K-omega SST

En la mecánica de fluidos computacional, el modelo de turbulencia k-omega ($k-\omega$) es un modelo de turbulencia común de dos ecuaciones, utilizado como cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (ecuaciones NSPR). El modelo intenta predecir

la turbulencia mediante dos ecuaciones diferenciales parciales de dos variables, k y ω , siendo la primera variable la energía cinética de turbulencia y, la segunda, la razón específica de disipación (de la energía cinética de turbulencia k a energía térmica interna). El modelo de turbulencia SST k-omega, es entonces una especie de modelo de viscosidad de remolino de dos ecuaciones que se utiliza para muchas aplicaciones aerodinámicas. Es un modelo híbrido que combina los modelos (AUTODESK, 2018).

Ecuación 7

Modelo de turbulencia K-omega SST

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \rho P - \beta \rho w k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \alpha \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \text{ con } P = r_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \rho P - \beta \rho w k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \alpha \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{p \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

Nota: Adaptado (Richmond Navarro, 2019)

3. Los modelos SST exhiben menos sensibilidad a las condiciones de flujo libre (flujo fuera de la capa límite) que muchos otros modelos de turbulencia.
4. El limitador de esfuerzo cortante ayuda al modelo k-omega a evitar la acumulación de energía cinética turbulenta excesiva cerca de los puntos de estancamiento.
5. Los modelos SST proporcionan una plataforma para extensiones adicionales como SAS y transición de turbulencia laminar.

5.1.8 *Fluidos multifase*

En los fluidos multifase tienen la posibilidad de descubrir 2 topologías primordiales, flujos dispersos y flujos separados. Se explica a los flujos dispersos como esos que se hallan conformados por partículas, burbujas o bolsas de fluido distribuidas en una etapa continua; y a los flujos separados como 2 líneas sucesivas de flujo de diferentes fluidos, que se hallan separadas gracias a la tensión que se forma entre ellos. La interacción en un flujo bifásico produce configuraciones complejas gracias a la relación molecular que existe en medio de las etapas. Estas configuraciones tienen la posibilidad de ser descritas por medio de los patrones formados por los fluidos. En diversas distribuciones que se han generalizado desde diferentes estudios para una configuración gas líquido, y se han clasificado para ductos verticales y horizontales, aunque de manera general resultan muy parecidos (Melo, 2018).

Un flujo multifase se caracteriza por el hecho de estar formado por 2 o más fluidos y/o elementos de diferentes características. Describiendo a los fluidos inmiscibles como una sustancia que no podría ser mezclada para conformar una mezcla homogénea, dentro un flujo multifase, hay una división a grado molecular entre los diferentes elementos del flujo (Quispe, 2022) . Los flujos multifase tienen la posibilidad de clasificar según las diversas etapas o elementos que lo integran, ejemplificando, uno se puede referir a ellos dependiendo del tipo de etapa como: flujo gas/sólido, gas/líquido, líquido/sólido, y así sucesivamente o dependiendo del número de etapas que lo incorporen, como flujo bifásico o trifásico (Melo, 2018).

5.1.9 *Solucionador interFoam*

Cómo se ha mencionado, OpenFOAM solo es ejecutado en sistema operativo Linux. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó Ubuntu, una distribución de Linux que actualmente está disponible como una terminal para Windows 10. Para la ejecución de cualquier *solver* se requiere una serie de ficheros, organizados en carpetas, con la información requerida para estos como las ecuaciones, parámetros, condiciones de frontera, entre otros (Greenshields, 2022).

Para la modelación de la canaleta Parshall trabajaremos con el grupo Multiphase que permite la solución de simulaciones donde interactúan varios fluidos de características variadas y, en específico, el interFoam que permite “solucionar dos fluidos compresibles, isotérmicos inmiscibles utilizando volúmenes finitos”. Los ficheros y la organización en carpetas requeridas para el solver interFoam (Díaz Alarcón, 2020).

5.1.10 Algoritmo PIMPLE

El solucionador es transitorio, lo que permite pasos de tiempo relativamente grandes gracias al algoritmo híbrido PISO-SIMPLE (PIMPLE). Así las cosas, el algoritmo PIMPLE es una combinación de PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) y de SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). De tal modo, estos algoritmos son iterativos, pero PISO y PIMPLE son transientes mientras que SIMPLE es usado para estados estacionarios (Carita, 2018).

De este modo, la mejor forma de entender este algoritmo es pensado que PIMPLE es el solucionador SIMPLE para cada salto de tiempo, donde correctores externos son los iteradores y una vez cubiertos pasarán al siguiente tiempo hasta que la solución este completa, originando así en PIMPLE mayor estabilidad, especialmente cuando se enfrente a mayores saltos de tiempo en el cual se quiera preservar el número de Courant bajo valores normales o la naturaleza del problema es inestable (Carita, 2018).

En este sentido, el número de correctores externos definen cuántas iteraciones exteriores debe desarrollar, en otras palabras, cuantas veces el sistema de ecuaciones será desarrollado antes de que se mueva al siguiente salto de tiempo, sin considerar que la solución está cubierta para ese salto de tiempo. Este número no significa que correrá las equivalentes iteraciones, esto únicamente hará de que itere hasta que se cubra el salto de tiempo, siendo el criterio para la convergencia el valor absoluto de tolerancia, esto causa mayor estabilidad cuando la solución sea complicada (Villamizar Hernández, 2014).

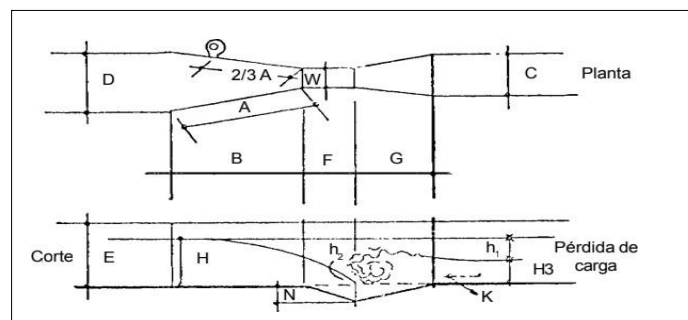
5.1.11 Canaleta Parshall y ecuaciones de Canaleta Parshall

El sistema de procesamiento de agua potable comprende diversos procesos que necesitan de eficiente operación para obtener agua apta para consumo humano, entre ellos la mezcla instantánea donde se inicia la clarificación desde la aplicación de insumos químicos coagulantes. Dicha mezcla debería desarrollarse en tiempos, magnitud de agitación y homogeneidad exactos para asegurar la eficiencia del proceso, para lo que se recurre en Colombia al uso de canaletas Parshall como construcciones hidráulicas formadoras de resalto que permiten la mezcla, sin embargo deficientes diseños de las mismas y variabilidad de caudales a la ingreso a la planta de procedimiento, tienen la posibilidad de perjudicar el proceso y dejar remanentes en el agua para consumo con incidencia en la salud humana, como tienen la posibilidad de ser sulfatos, aluminio, hierro, etcétera. Además del precio económico para los usuarios por la pérdida de insumos químicos con importante costo (Espinosa Salgado & Gaitan Olano, 2018).

La canaleta de Parshall posibilita obtener medidas precisas del caudal, con una exclusiva lectura de la regleta del dispositivo, el flujo es independiente y la rapidez del agua al ingreso de la garganta es más grande que la de aproximación, lo cual previene la sedimentación (Mingjun Diao et al., 2018) El aforador Parshall está formado por 3 secciones: acceso (convergencia), garganta o parte estrangulada y salida (divergencia), la primera muestra 2 paneles verticales simétricos y convergentes, y de un fondo que es horizontal, la segunda además tiene 2 paneles verticales empero paralelos, y la base es inclinada hacia abajo, la tercera consta de 2 paneles verticales que divergen entre sí (Figura 4) (Canepa de Vargas, 2004).

Figura 4

Canaleta de Parshall



Nota: Adaptado. (Canepa de Vargas, 2004).

Los valores de las dimensiones para cada ancho de garganta estipulado en el manual de hidráulica se presentan en la Figura 5.

Figura 5

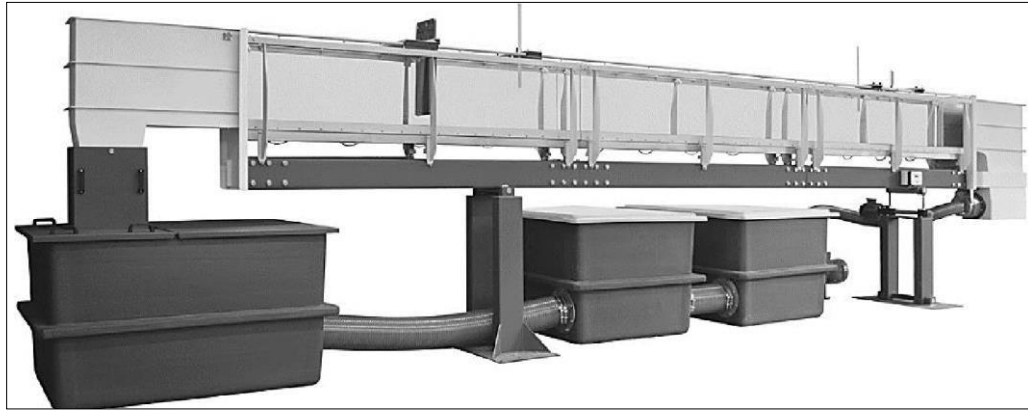
Dimensiones para cada ancho de garganta

W		A	B	C	D	E	F	G	K	N
1"	2.5	36.3	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9
3"	7.6	46.6	45.7	17.8	25.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7
6"	15.2	62.1	61.0	39.4	40.3	45.7	30.5	61.0	7.6	11.4
9"	22.9	88.0	86.4	38.0	57.5	61.0	30.5	45.7	7.6	11.4
1'	30.5	137.2	134.4	61.0	84.5	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
1 1/2'	45.7	144.9	142.0	76.2	102.6	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
2'	61.0	152.5	149.6	91.5	120.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
3'	91.5	167.7	164.5	122.0	157.2	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
4'	122.0	183.0	179.5	152.5	193.8	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
5'	152.5	198.3	194.1	183.0	230.3	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
6'	183.0	213.5	209.0	213.5	266.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
7'	213.5	228.8	224.0	244.0	303.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
8'	244.0	244.0	239.2	274.5	340.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
10'	305.0	274.5	427.0	366.0	475.9	122.0	91.5	183.0	15.3	34.3

Nota: Adaptado (Aponte Castillo, 2019).

5.1.12 Canal hidráulico para ensayos

Se modelará el canal hidráulico para ensayos que se encuentra ubicado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio, el canal correspondiente a la referencia FC300 de la marca TecQuipment Ltd., con dimensiones en el canal de 7.5 m de longitud, una altura de 0.40 m y 0.30 m de ancho. 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 (TecQuipment, 2018).

Figura 6*Canal Hidráulico de Ensayos*

Nota: Adaptado (TecQuipment, 2018)

5.1.13 OpenFOAM

Con la llegada de la evolución de la tecnología han surgido ciertos softwares libres de CFD cuyo grado de calidad y sofisticación los permanecen convirtiendo en una competencia real al programa comercial siendo OpenFOAM el más reconocido y empleado a día presente y en el que nos centraremos a lo largo del desarrollo de la investigación. Existe un profundo incremento del CFD en los últimos años. Prueba de eso es el gran número de publicaciones científicas en la popular base de datos Scopus a partir del año 2006 hasta 2014 (Muñoz Barranco, 2015). Este programa surgió en el Imperial College de Londres, una organización con una profunda tradición en averiguación en el campo de la fluidomecánica, el cual fue centro investigador de técnicas en relación con el CFD a partir del año 1960. OpenFOAM ha sido al principio desarrollado por OpenCFD Ltd. Organización establecida por alumnos de doctorado de la escuela y ha sido compartido después por la fundación OpenFOAM que tiene como primordial objetivo gestionar el desarrollo e independiente repartición del programa (Muñoz Barranco, 2015).

El paquete OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) es un instrumento gratuito y de código abierto con una enorme base de usuarios de la mayoría de las superficies de la ciencia e ingeniería. OpenFOAM está organizado en un grupo de módulos C++ flexibles posibilitan

la resolución de hasta los flujos más complicados con cambios en las propiedades químicas, flujos turbulentos, transferencia de calor, etcétera. Incluye además herramientas de pre y post procesado y da la probabilidad de cálculo en paralelo. El programa tiene además una gran variedad de casos resueltos de simulaciones o tutoriales organizados conforme el tipo de flujo que caracteriza el problema y el solver empleado en su resolución (Muñoz Barranco, 2015).

Sin lugar a dudas uno de los enormes atractivos de este programa es la licencia de código abierto por medio de la cual se distribuye, dotando de esta manera de independencia plena al cliente para cambiar el código original y que de esta forma logré adaptar cualquier problema de mecánica de fluidos a sus intereses particulares. La manera básica de hacer en otros términos partir de un caso especial y cambiar los archivos del mismo así sea reescribiéndolos o bien copiando y pegando líneas de código de otros casos para adaptar la situación primaria a las necesidades del cliente (Muñoz Barranco, 2015). Es común que sean los propios usuarios los que más adelante pongan este nuevo código en la red para que logre ser de utilidad para los demás usuarios, inclusive hay foros específicos donde los usuarios tienen la posibilidad de compartir sus inconvenientes y vivencias con el programa garantizando de esta forma la vida y el desarrollo del mismo.

5.1.14 Programa Blender

Blender es un software es importante para definir las condiciones de frontera geométrica del dominio de control Según la publicación en el foro online de OpenFOAM “BVTKNodes: representación fotorrealista de los resultados de OpenFOAM en Blender” (Cortez Villada et al., 2012). También es programa multiplataforma, dedicado especialmente al modelado, iluminación, renderizado, la animación y creación de gráficos tridimensionales. También de composición digital utilizando la técnica procesal de nodos, edición de vídeo, escultura (incluye topología dinámica) y pintura digital. El programa fue inicialmente distribuido de forma gratuita, pero sin el código fuente, con un manual disponible para la venta, aunque posteriormente pasó a ser software libre. Actualmente es compatible con todas las versiones de Windows, macOS, GNU/Linux, Android, Solaris, FreeBSD e IRIX (Cortez Villada et al., 2012)

5.1.15 Programa ParaView

ParaView es utilizado en el post procesamiento y otorga notables beneficios en cuanto a la presentación de los mismos, donde se pueden medir diferentes variables como presión, volumen y láminas de agua. ParaView que nos permite visualizar de manera gráfica todos los comportamientos modelados. De este se pudo obtener los valores de las alturas de lámina de agua, el comportamiento temporal de la presión en puntos establecidos y, por supuesto, la variación temporal de la masa de agua (Díaz Alarcón, 2020).

Estado del Arte

Según lo dicho por Mohammadian et al. (2021), existieron simulaciones de diversos tipos de flautas Venturi y Parshall a partir del uso de siete perturbaciones diversas, haciendo uso de la interfaz de simulación pública OpenFOAM; por lo tanto, en cuanto a la comparación de los resultados arrojados producto de la simulación con aquellos datos experimentales físicos, se evidenció que, a partir de los modelos de perturbación, el modelo turbulento K proporciona resultados del modelo mucho más puntuales y precisos, continuamente del modelo dinámico K-LES para esos datos. El error más grande es aproximadamente de 2% a 3%, en la estimación de los tirantes lo que da a entender que, el modelo de simulación se puede usar de forma confiable para lograr tener una estimación del flujo del canal; por tanto, en las diferentes secciones que hay dentro del canal, el modelo K arroja el margen de error más bajo el cual es de 1.93%; lo anterior, deja ver que, los datos de la superficie del agua son correctamente calculados por dicho modelo, puesto que, los perfiles de la superficie del agua siguen la misma curva vertical, de igual forma que en los datos experimentales. Para determinar el tamaño óptimo de la malla, se utilizó una malla estructurada y un análisis de la sensibilidad de malla. El propósito de este análisis de Mohammadian et al. (2021), es encontrar el tamaño de malla más fino para el cual los resultados no serán afectados. A medida que el tamaño de la malla gruesa original se hizo más fina, los niveles de agua simulados se acercaron a los valores de los datos experimentales registrados por los equipos de laboratorio. En

este estudio, el número inicial de celdas era 52.200, y se aumentó gradualmente a 74.496 y luego a 263.700. En los resultados de la dos últimas mallas más finas, no se registraron cambios significativos en la calidad de los datos simulados. Por lo tanto, no se recomienda aumentar más el número de células después de 74.496 en todos los modelos de turbulencia restantes (Heyrani et al., 2021).

Julca Orrillo et al. (2020), Simulo la canaleta Parshall en OpenFOAM presentado dificultades en el ingreso de las condiciones de frontera y la creación del mallado, para definir la geometría. En la creación de parches (caras), había dos caras superpuestas lo cual no permitía generar la superficie (cascarón), como solución borró todas las caras y generaron nuevas verificado que no se interceptan entre sí. En la creación de la malla, en la parte gráfica se generó una malla con aperturas muy grandes, por lo tanto, al elegir los valores de longitud, considerar lo que se quiere simular en caso de canales que no varíen su geometría no habría problema, pero en canal Parshall es mejor evaluar en forma más detallada cambiando valores de longitud en la Hipótesis.

Velázquez et al., (2021) realizó un análisis hidráulico de un vertedero compuesto (triangular-rectangular) mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) donde se utilizó el *software* 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. Se utilizó el módulo *Meshing* para generar la malla del dominio, para la discretización espacial se decidió emplear una malla predominantemente hexaédrica para reducir el número de elementos de dominio y la mejora de la convergencia de la solución. En Colombia, Aponte Castillo, (2019) modeló el Flujo en 3-D en procesos de Mezcla Rápida en Plantas de Tratamiento Utilizando OpenFOAM, se propuso diferentes mallas y modelos de turbulencia en cada caso. En la simulación se utilizó un solucionador pimpleDyMFoam, el cual es una variante del solucionador simpleFoam, de tipo transitorio para flujo incompresible y turbulento de fluidos Newtonianos que permite realizar cálculos con pasos de tiempo relativamente grandes y que además permite el uso de mallas dinámicas.

Cuenca Gaona, (2019) modeló la longitud mínima de aproximación para una canaleta Parshall por medio de OpenFOAM. Se recomendó un mallado hexaédrico para reducir tiempo computacional, y mejorar la estabilidad y convergencia del modelo, para este paso en particular manejar un refinamiento de 4X resulta bastante óptimo. Gonzalías (2019) modeló CFD para caracterizar la hidrodinámica de un floculador hidráulico tipo Alabama en la PTAP “el arroyo” localizada en Santander de Quilichao. La calidad de la malla fue elemento significativo en la convergencia, estabilidad y exactitud de los resultados en la simulación, Por consiguiente, la división realizada en el dominio computacional permitió un mallado conformado por hexaedros que reducen el número de elementos y el tiempo computacional, obteniendo una alta calidad de la malla, el cual fue creado con el programa Meshing by ANSYS Inc. versión 16.1. Para representar el comportamiento hidrodinámico del fluido en el floculador se usó el modelo Viscous – Estándar K-de turbulencia, dando los mejores resultados en términos de convergencia de la solución.

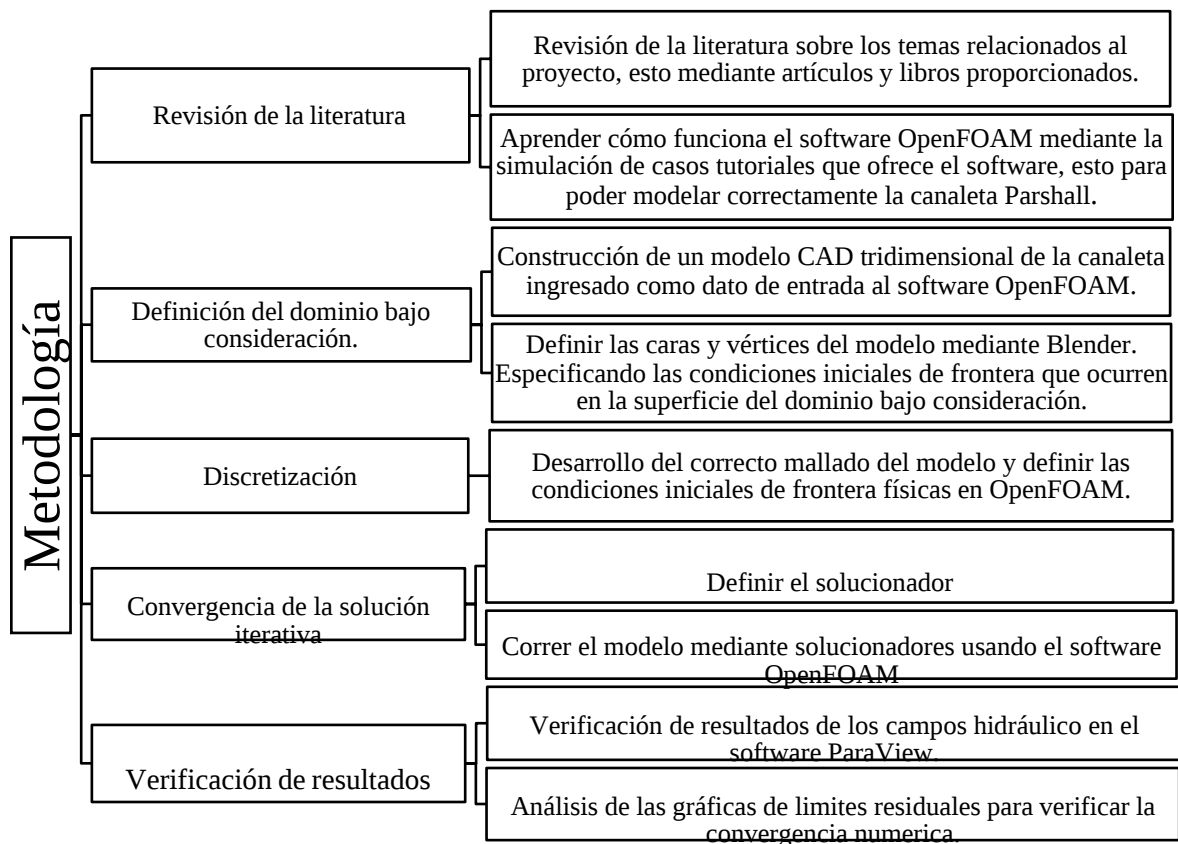
En la universidad Santo Tomás se destaca la tesis de pregrado realizada por Díaz Alarcón, (2020), en la cual se modela con CFD (software OpenFOAM) un vertedero rectangular y triangular del canal hidráulico del laboratorio de hidráulica de la universidad santo Tomás, sede Villavicencio”. Donde analizaron 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. Para determinar los volúmenes de control mediante el método de los elementos finitos, se determina que los tetraedros donde sus caras 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 de la misma. Aponte Castillo, (2019) diseñó construyó una canaleta Parshall para el laboratorio de hidráulica de la sede Bogotá, esta información podría servir como guía para la elaboración del prototipo de canaleta Parshall. No se encontró en la presente revisión bibliográfica estudios realizados en la universidad Santo Tomás que incluya la modelación numérica para canaletas Parshall.

6. Metodología

Para dar una introducción a la metodología se mostrará a continuación un diagrama con la metodología como guía en el desarrollo del presente trabajo, esto para hacer una representación clara de la secuencia de las etapas necesarias para alcanzar los objetivos propuestos y las respectivas actividades que son necesarias realizar en cada una de las etapas de la investigación.

Figura 7

Metodología para el desarrollo.



Nota. Descripción de la metodología en diagrama

Se establece una metodología cuantitativa, basado en etapas de ejecución de actividades como se describen a continuación:

6.1. Etapa 1: Revisión de la literatura.

Revisión de la literatura sobre los temas relacionados al proyecto, especialmente en las siguientes áreas: 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. Los fenómenos de turbulencia y el resalto hidráulico.

Se realiza una revisión de la literatura con el fin de recopilar información existente sobre investigaciones referentes a los modelos de CFD para Canaleta Parshall y otro tipo de estructuras hídricas, preferiblemente se realiza la búsqueda con terminología en inglés como, por ejemplo: Parshall flume, venturi flume, Turbulence model, Numerical Simulation, CFD, OpenFOAM. con el fin de extraer información de artículos científicos, revistas, internet, trabajos de investigación, libros, entre otros, en base a lo anterior se puede analizar y conocer el estado del arte de la investigación. Para validar esta relación bibliográfica es importante considerar los siguientes parámetros:

1. Selección bibliográfica: Se indaga en diferentes fuentes de información como Scopus, Google Scholar, ScienceDirect entre otras herramientas de investigación, repositorios, páginas web, libros, entre otros.

2. Análisis de bibliografía referente: Mediante una matriz de análisis de fuentes de información científica se determinó el estado y los temas tratados en la investigación, revisando su resumen y conclusiones.

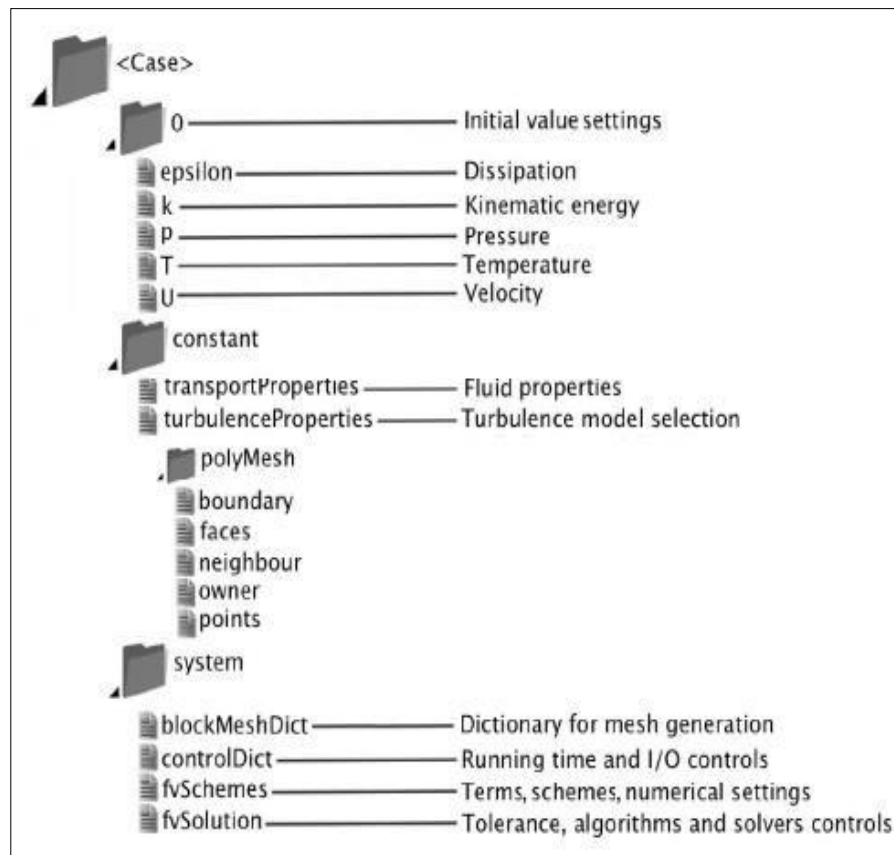
Para aprender del software OpenFOAM se descargaron casos tutoriales con su respectiva guía; Esta serie de catorce casos tutoriales contiene ejemplos diseñados para ayudar a los usuarios a aprender importantes herramientas y funciones de OpenFOAM, incluida la generación de mallas, el modelado multifase, el modelado de turbulencias, el procesamiento paralelo y el modelado de reacciones. Los ejemplos de prácticas básicas se pueden importar directamente desde la carpeta de

instalación de OpenFOAM en la web (Haddadi et al., 2019). La estructura de cada caso sigue la siguiente estructura general:

- a) Antecedentes: una introducción sobre los temas clave explorados en el tutorial y la teoría de CFD que será relevante en el caso.
- b) Preprocesamiento: Explica los pasos para configurar la estructura de casos correctamente para un problema dado utilizando un tutorial de casos básicos, con explicaciones de los diccionarios relevantes. La mayoría de los casos en OpenFOAM tienen la siguiente estructura básica de casos (directorio árbol):

Figura 8

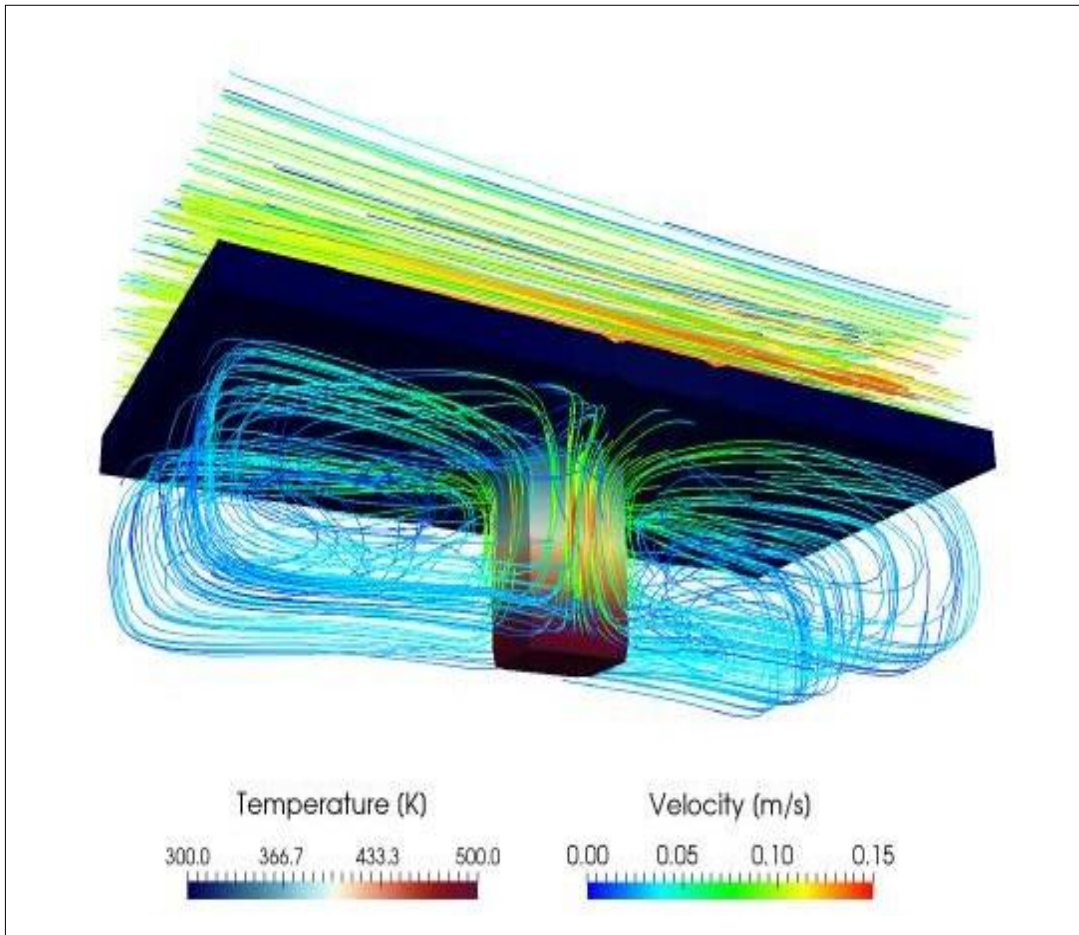
Estructura del caso elbow



Nota. Hay tres directorios principales (0, constante, sistema) en cada carpeta de caso.

Adaptado de (Haddadi et al., 2019).

- c) Post Procesamiento: Análisis de los resultados del modelo en la aplicación de postprocesamiento ParaView que es compatible con OpenFOAM.

Figura 9*Caso tutorial snappyHexMesh – Multi-Región*

Nota. Visualización de la velocidad y presión en el software ParaView de postprocesamiento distribuido con OpenFOAM, caso tutorial snappyHexMesh. Adaptado de (Haddadi et al., 2019).

6.2. Etapa 2. Definición Del Dominio Bajo Consideración

Para definir el dominio físico se necesita tomar las medidas del canal hidráulico que se encuentra en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio. Se eligió este canal para validar después con resultados experimentales de un prototipo físico de la canaleta Parshall que se utilizará como accesorio del canal. Estas medidas serán las dimensiones que definen el dominio bajo consideración y con el cual se trabajara las simulaciones del modelo matemático.

Figura 10

Toma de dimensiones del canal hidráulico



Teniendo las dimensiones del canal y la canaleta Parshall, se determina el dominio bajo consideración, construyendo un modelo CAD tridimensional del canal, que será ingresado como dato de entrada al software OpenFOAM. Posteriormente para definir las condiciones geométricas del modelo se ingresó el modelo CAD al programa multiplataforma de acceso libre Blender, donde se definieron las condiciones geométricas de frontera físicas del dominio de estudio. Posterior a definir las condiciones de frontera geométricas o caras, OpenFOAM requiere que se identifique dichas fronteras geométricas previas al Mallado en formato “. fms”. Finalmente, el tipo de condición de frontera es numérica. En términos matemáticos, estos son respectivamente un valor especificado y una condición límite especificada por flujo. (Moukalled et al., 2016).

6.3. Etapa 3. Discretización

La discretización permite que las ecuaciones diferenciales se resuelven numéricamente dividiendo el campo computacional en pequeñas celdas (volúmenes de control) y definiendo un número finito de nodos donde se calcularon las variables de la ecuación conservación de energía, masa y momentum, estas ecuaciones se resolverán utilizando los solucionadores de OpenFOAM. (Moukalled et al., 2016) Esto nos da como resultado el diseño de la red de volúmenes finitos (o mallado del modelo) en los que se discretiza el dominio bajo consideración. Posterior a definir el programa las condiciones de frontera geométricas y contar con un dominio discretizado, se debe definir las condiciones de frontera numérica de las caras discretizadas, esto para cada una de las variables del solucionador (Moukalled et al., 2016).

6.4. Etapa 4. Convergencia de la solución iterativa

Para la modelación de la canaleta Parshall se trabajará con el grupo Multiphase, que permite la solución de simulaciones donde el flujo es simultaneo de materiales en diferentes fases, puede haber múltiples componentes presentes en cada fase, en este caso al ser un canal abierto el agua estará en contacto con el aire, por lo tanto, los flujos multifásicos son gas-líquido. El solucionador del grupo Multiphase que se utilizara es interFoam, ya que resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para dos fluidos inmiscibles isotérmicos e incompresibles, se basa en el enfoque de volumen de fluido (VOF) (Haddadi et al., 2019). Se usará interFoam ya que el caso de estudio se trata de un flujo multifase, isoterma e isotrópico que además incorporará ecuaciones de flujo turbulento y será analizado en estado estable. Como siguiente paso está la convergencia de la solución iterativa, siendo esto el correr del modelo matemático mediante solucionadores de OpenFOAM definiendo los esquemas de discretización y los límites de los residuos. Finalmente, se tiene la verificación de los resultados se visualizará en el software ParaView de postprocesamiento 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.

6.5. Etapa 5. Verificación de los resultados

Visualización de las variables de los diferentes campos con el fin de comprobar la veracidad del modelo matemático de acuerdo a lo especificado en la literatura acerca de la conservación de la energía, masa y momentum.

Idealmente, se dice que una solución ha convergido cuando no cambia con más iteraciones. Sin embargo, en la práctica, se establece una solución convergente cuando el cambio entre dos iteraciones consecutivas es menor que la cantidad nula. La convergencia se usa generalmente para describir la obtención de una solución por cualquier método. El término "convergencia" se utiliza a veces para describir el logro de soluciones independientes de la red, es decir, soluciones que no cambian a medida que se mejora la red (Moukalled et al., 2016).

Por otro lado, para verificar la convergencia o verificación teórica del modelo matemático es necesario revisar los límites residuales, ya que cualquier solución iterativa se necesita verificar su veracidad (Moukalled et al., 2016). Se analizarán las gráficas de límites residuales o error, siendo esto una medida del desequilibrio en las ecuaciones de conservación y se acepta la convergencia cuando el residual es del orden de $10^{-3} - 10^{-4}$, y dependiendo también del campo de estudio (Muñoz Barranco, 2015).

7. Resultados y Análisis

En la **Tabla 1** se encuentran las dimensiones del canal hidráulico de estudio, el cual operó con un caudal constante de 13 L/s. En la Figura 11, por otro lado, se presentan las dimensiones del prototipo de la canaleta Parshall.

Tabla 1

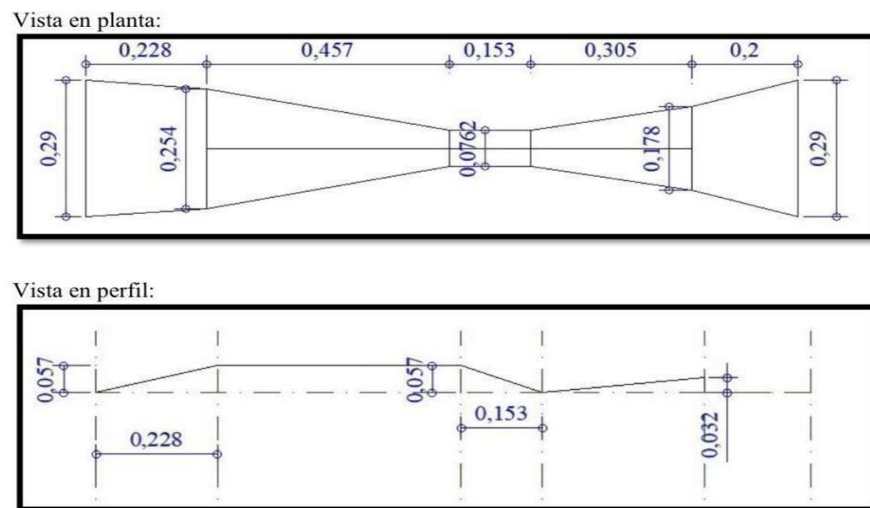
Dimensiones del canal hidráulico

Características del Canal			
Caudal	13	l/s	
Longitud	7,5	m	
Ancho	32	cm	
Alto	45	cm	
Espesor	1	cm	

Nota. Datos de Laboratorio

Figura 11

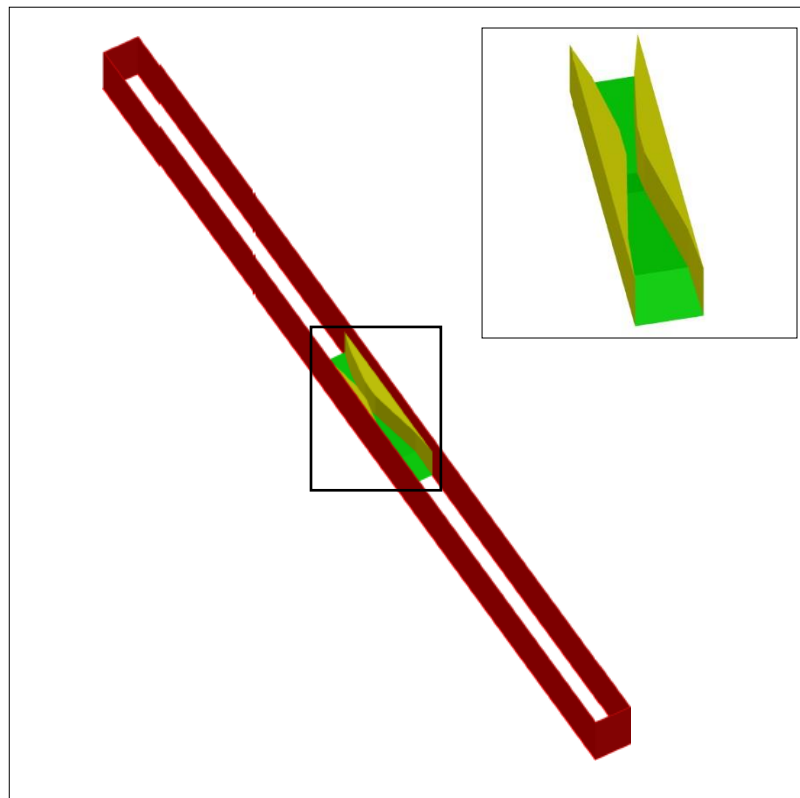
Dimensiones de la canaleta Parshall



Con las dimensiones del canal hidráulico y la canaleta Parshall, se construyó un modelo CAD tridimensional. Para el modelo es necesario tener los dibujos en planta de un solo plano, desde donde se extruye en el plano XZ a 45 cm dando como resultado un sólido., Para la canaleta, la base de la unidad está dibujada en el plano XZ, mientras que el perfil está en el plano YZ y ambos en polilínea. Se extruye la base del plano XZ a 10 cm y para el perfil de la canaleta a 30 cm en el plano YZ, los dos sólidos se interceptan para formar la base de la canaleta, y al extrudir igualmente las paredes de la canaleta a 29 cm y unir todos los sólidos se obtiene como resultado un sólido como se muestra en la Ilustración 6, este sólido será exportado como formato stl a Blender. En este punto se recomienda eliminar la mayor cantidad de detalles de dibujo que generen irregularidades especialmente en las paredes de las geometrías. Para que el modelo se pueda exportar a Blender y no se presenten problemas a la hora de crear el mallado del modelo es necesario que el CAD sea sólido.

Figura 12

Modelo CAD tridimensional

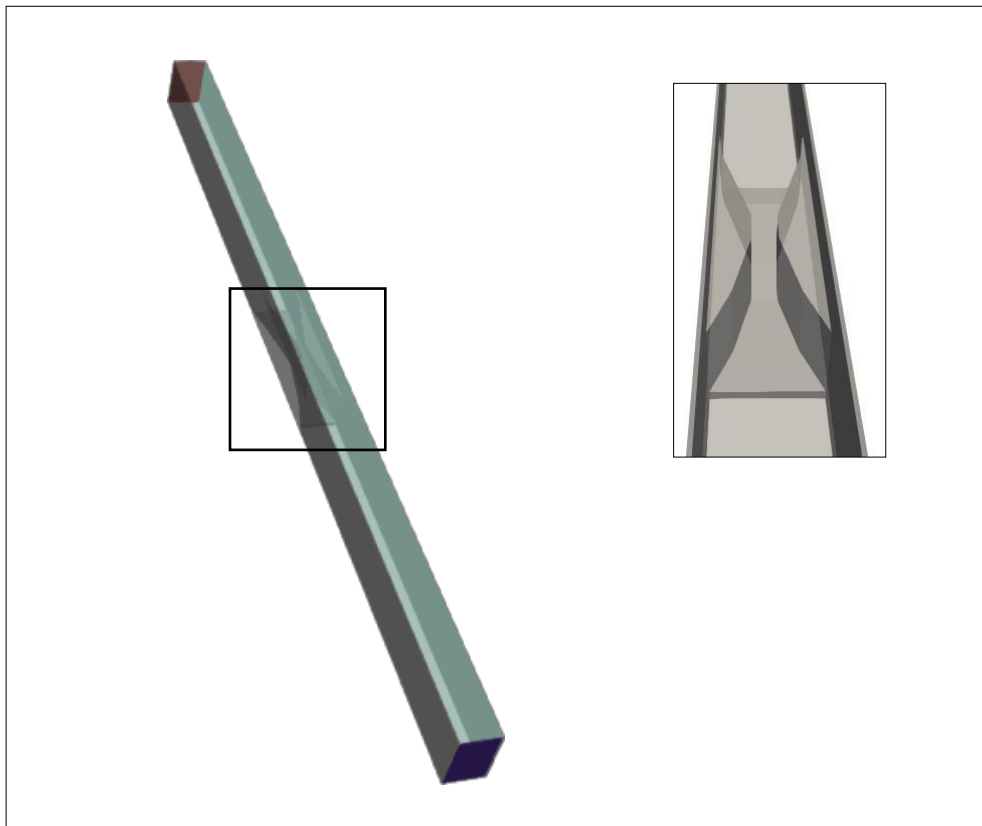


Nota. Modelo CAD tridimensional, con su respectivo detalle de la canaleta mostrada en la parte superior izquierda.

Para definir las condiciones de frontera geométricas del caso de estudio, en el programa Blender se importa el modelo CAD tridimensional en formato stl. Del modelo se extraen las caras como se muestra en la Figura 13, donde se encuentra la entrada de agua (Rojo) se denomina “inlet”, la salida de descarga del canal (azul) se establece como “outlet”, las caras libres (azul claro) como la atmósfera “atmosphere” y, por último, las demás caras sólidas (gris) como las paredes se definieron como “Wall”. 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 ``".

Figura 13

Condiciones de frontera geométricas



Nota. Condiciones de frontera mostradas, con su respectivo detalle de la canaleta mostrada en parte superior izquierda.

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 posteriormente se realice su solución. Para esto, se crearon volúmenes finitos de 15cm de ancho para las zonas centrales del modelo y refinamientos de 1cm cerca de las paredes con 5 subdivisiones (boundaryLayers). Posteriormente, se creó la malla con el comando “cartesianMesh”. De donde se obtuvo una malla de aproximadamente 1.290.489 cubos debido al gran tamaño del canal (7 m de largo).

Figura 14

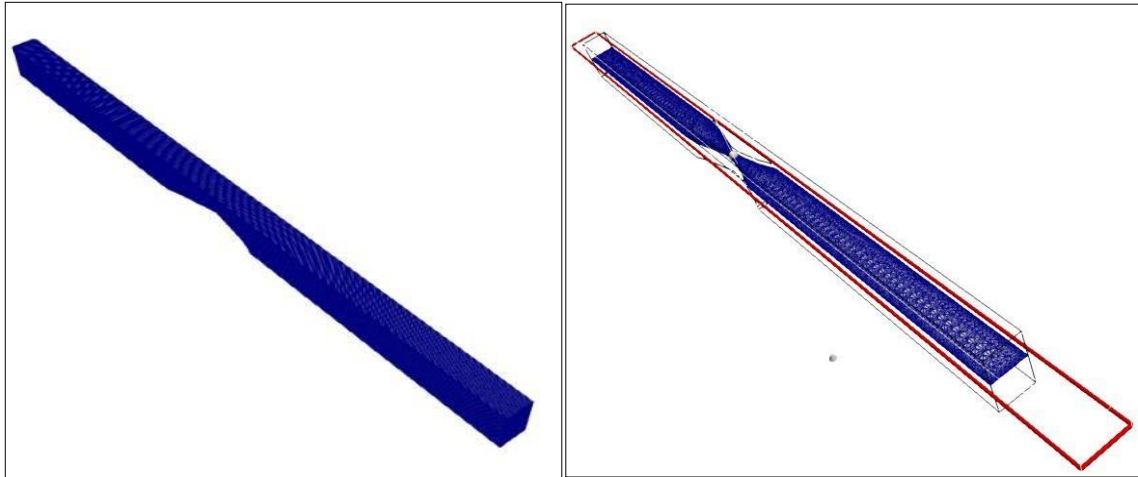
Creación del mallado

```
surfaceFile "canaleta.fms";  
  
minCellSize 0.01;  
  
maxCellSize 0.15; //Anteriormente usaban 0.05  
  
boundaryCellSize 0.01;  
  
localRefinement  
{  
    "inlet.*"  
    {  
        cellSize 0.01;  
    }  
    "outlet.*"  
    {  
        cellSize 0.01;  
    }  
    "wall.*"  
    {  
        cellSize 0.01;  
    }  
    "atmosphere.*"  
    {  
        cellSize 0.01;  
    }  
}
```

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

Figura 15

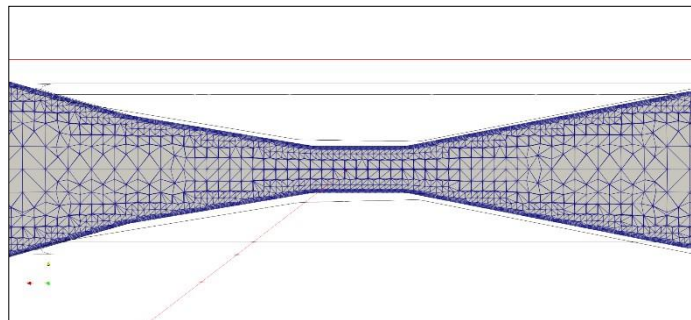
Mallado de la modelo vista en ParaView



Nota. Mallado de la modelo vista ParaView (izquierda), corte en el eje Z del modelo, se encuentra el detalle del mallado (derecha).

Figura 16

detalle del mallado de la reducción de la canaleta presentado en ParaView



Nota: Mallado de la modelo en detalle de la reducción de la canaleta en vista ParaView.

Después de tener especificadas las condiciones geométricas de frontera y el dominio bajo consideración discretizado, se necesita definir las condiciones numéricas de frontera o iniciales, A continuación, en la Figura 17 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-líquido

“Alpha”, tensión superficial “S”, viscosidad de turbulencia “nut”, energía turbulenta “k”, y disipación de energía de turbulencia “Omega”.

Figura 17

Condiciones de frontera numéricas

```

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField    uniform (1 0 0);

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      flowRateInletVelocity;
        volumetricFlowRate constant 0.013;
    }

    wall
    {
        type      noSlip;
    }

    atmosphere
    {
        type      pressureInletOutletVelocity;
        value      uniform (0 0 0);
    }

    outlet
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue  uniform (0 0 0);
        value      $internalField;
    }
}

```

Nota: Condiciones de frontera numérica para el campo de velocidades de OpenFOAM en la carpeta “0” (cero).

En la carpeta *fvsolution* del solucionador *interFoam*, se encuentran los ajustes para el método de acoplamiento de los campos, los métodos numéricos que se utilizan para resolver diferentes cantidades, y también la tolerancia final para la convergencia de esa cantidad (Haddadi et al., 2019). A continuación, En la Figura 18, se muestran algunos detalles del solucionador, para los campos “Alpha” y “presión corregida” del solucionador *interFoam*.

Figura 18*Detalles del solucionador InterFoam*

```

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;
    }
}

```

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

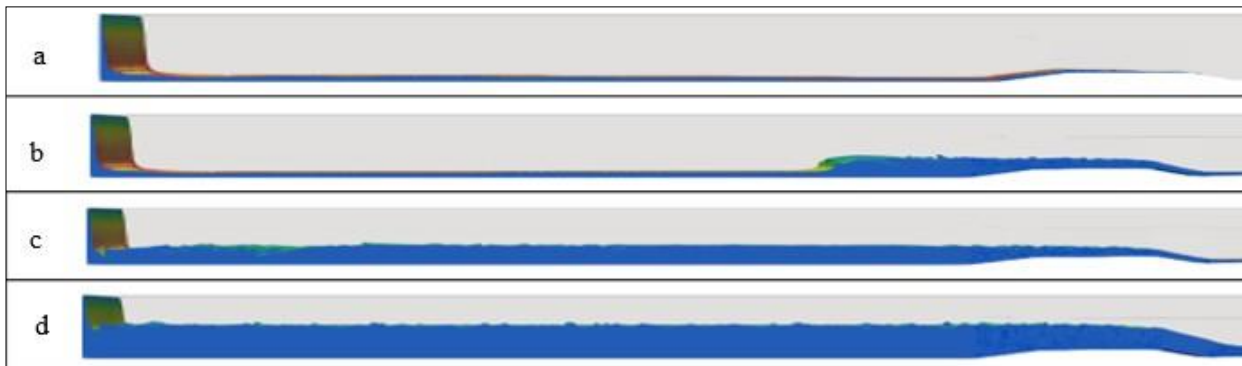
En el Anexo 1 se puede apreciar que posterior a la iteración 60 (tiempo entendido como iteraciones) se logra la estabilización del modelo (a las 8.15h de procesamiento) con mayor exactitud para el campo de presiones que el de las componentes de velocidad en “x”, “y”, y “z”. La mayor fuerza impulsora de deformación y movimiento del fluido se encuentra en el eje “Z”, esta fuerza es la gravedad, posiblemente por esto es la componente de velocidad que más presentó variabilidad. En el Anexo 2 Se logra observar que igual que las componentes de presión y velocidades, el sistema se logra estabilizar posterior a la iteración 60, evidenciando mayor variabilidad en los campos tensión superficial y la tasa de disipación de energía de turbulencia

“omega”. En general se logró residuales del orden de 10^{-3} , lo recomendados en (Muñoz Barranco, 2015) y aceptados para la exactitud de medición de los equipos del estudio.

En las gráficas de límites residuales se evidencia de la iteración 0 a la iteración 2992 un aumento de los residuales, esto debido a la entrada de agua al canal como se muestra en la Figura 19 (a). Cuando el agua llega a la pendiente de la canaleta se genera una onda en sentido contrario del flujo (b), debido a esto de la iteración 2992 a la 8785 hay una caída de los límites residuales. De la iteración 9791 a la 22473 se presenta nuevamente un pico en los límites, debido al choque de la honda con la entrada de agua (c), generando que vuelva a tomar su dirección en sentido del flujo, para finalmente después de la iteración 24401 llegar a la estabilización del modelo (d).

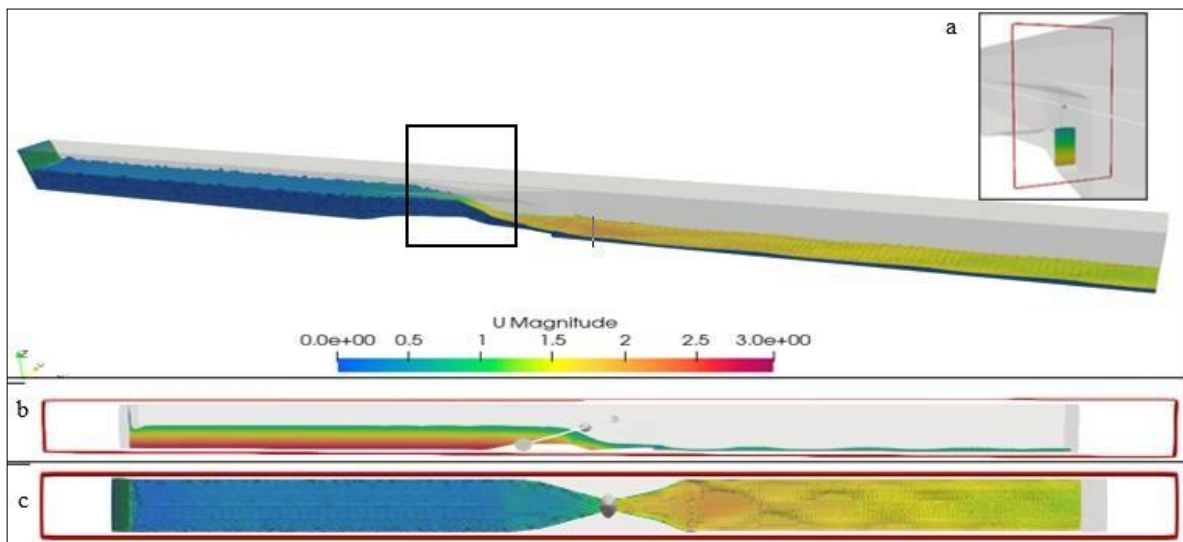
Figura 19

Descripción del comportamiento de la velocidad

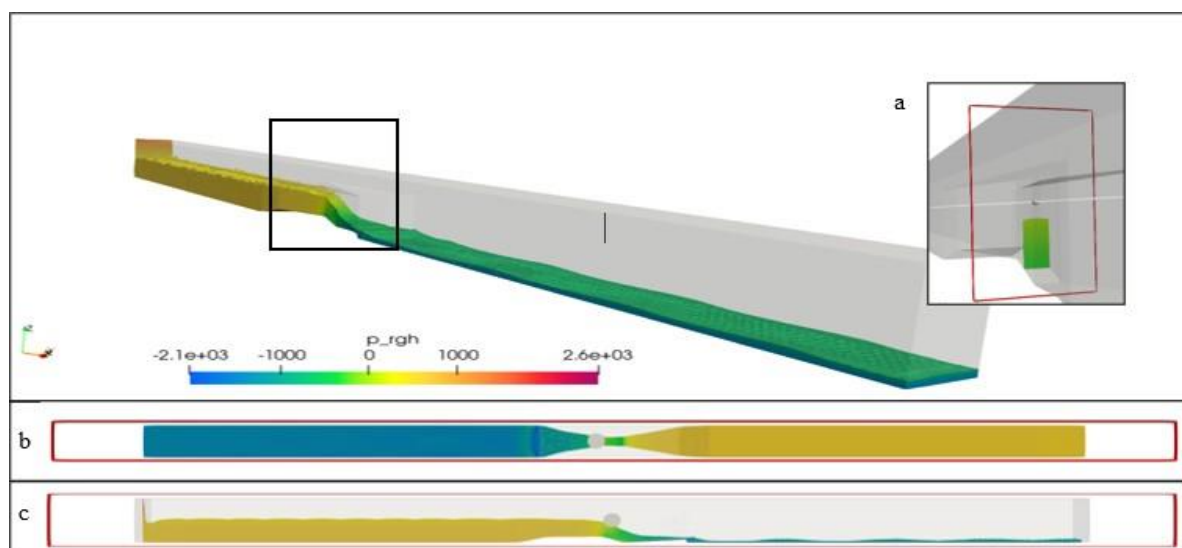


Nota: Vista en ParaView del campo velocidad.

En la Figura 20 y Figura 21, 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 (Moukalled et al., 2016).

Figura 20*Velocidad vista ParaView*

Nota: Vista en ParaView del campo de velocidad. Detalle del corte en X de la velocidad a mitad de la canaleta (a), en la parte inferior detalle del corte en y a mitad del canal (b) y el corte en z a 0.13cm (c).

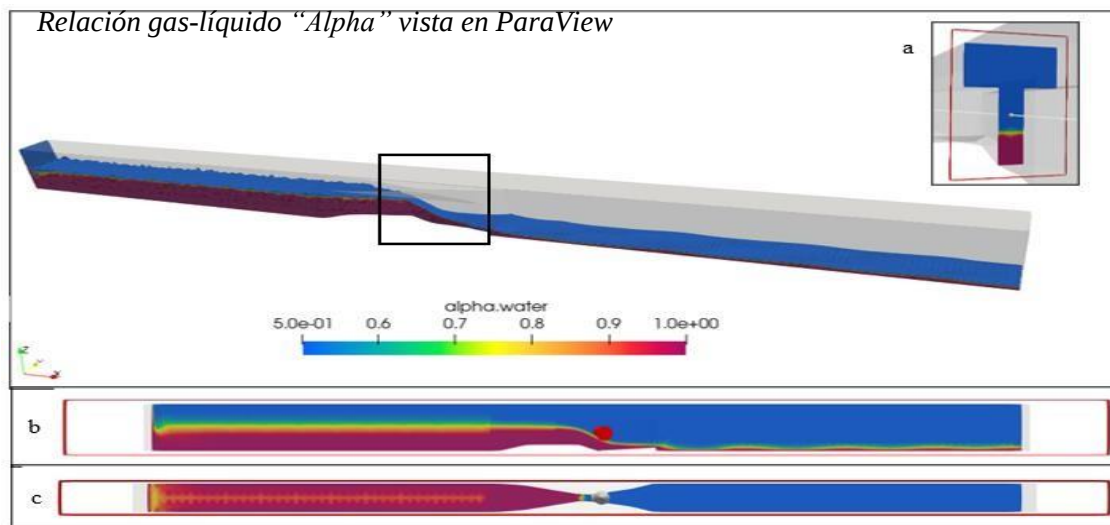
Figura 21*Presión vista en ParaView*

Nota: Vista en ParaView del campo presión. Detalle del corte en X de la presión a mitad de la canaleta (a), en la parte inferior detalle del corte en y a mitad del canal (b) y el corte en z a 0.13cm (c).

Para la configuración inicial del solucionador interFoam, se ajusta las fases de los fluidos, la condición inicial Alpha.water es la relación gas-líquido. En este archivo se especifican los valores iniciales y también las condiciones de contorno para el agua como primera fase y aire como segunda fase. El valor por defecto del campo Alpha.water se puede configurar en el archivo `defaultFieldValues`, donde se representa la fracción de volumen de la primera fase en la celda, 0 corresponde al 0% de la primera fase 1 corresponde al 100% de la primera fase). En la Figura 22 se evidencia en el corte del eje Y (b), donde pasa el agua está de color rojo, esto corresponde a la primera fase agua, cuando el agua entra en contacto con la fase aire y se combinan las fases generando un color amarillo, para finalmente encontrar solo la fase del aire de color azul. Este cambio desde el fondo del canal hasta su superficie se evidencia en los cortes X (a) y Y (a).

El corte z al estar a 0.13 cm desde el fondo hacia la superficie, se evidencia la entrada de agua hasta la reducción es de color rojo, esto quiere decir que antes de la reducción el tirante de agua se encuentra arriba del corte en z, pero al pasar la reducción se cambia a color azul, dando a entender que el tirante después de la reducción de la canaleta Parshall está por debajo del corte en Z. Es decir, que el tirante después de la reducción está por debajo de 0.13 cm desde el fondo a su superficie, y a esta distancia de 0.13 cm solo se encuentra aire.

Figura 22

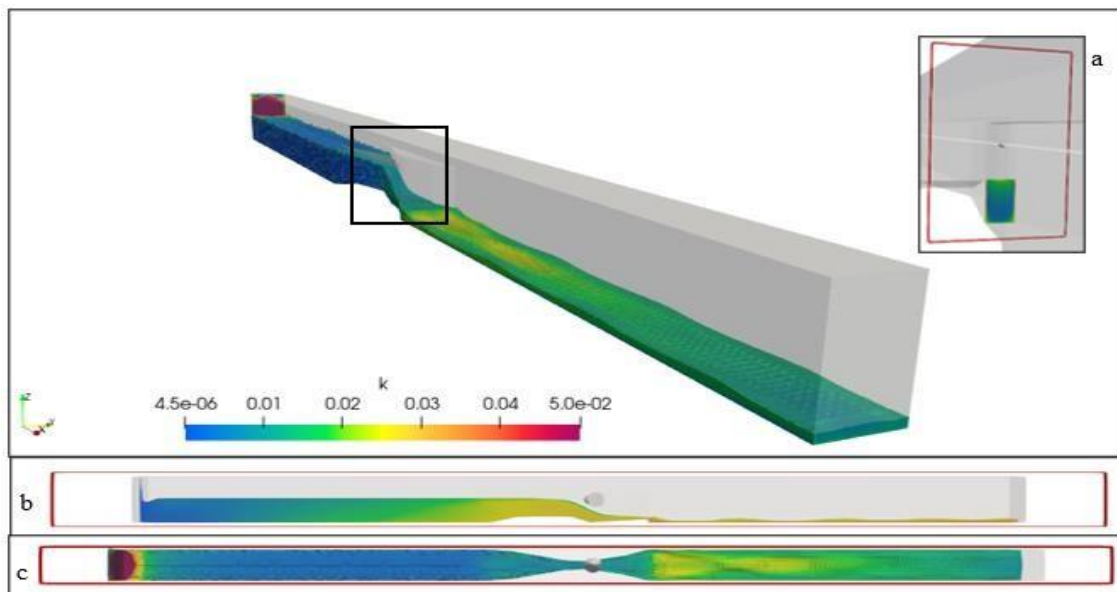


Nota: Vista en ParaView del campo "Alpha.water". Detalle del corte en X de la relación liquido-gas a mitad de la canaleta (a), en la parte inferior detalle del corte en y a mitad del canal (b) y el corte en z a 0.13cm (c).

El modelo de turbulencia que se implementó es K-omega SST, en este modelo se considera la energía cinética turbulenta “K” y la tasa específica de disipación de turbulencia “omega”. En dinámica de fluidos, la energía cinética de turbulencia es la energía cinética media por unidad de masa asociada con los remolinos en el flujo turbulento (Richmond Navarro, 2019). El “K” puede producirse por cizallamiento, fricción o flotabilidad del fluido, o mediante un forzamiento externo a escalas de remolinos de baja frecuencia. Luego, la energía cinética de turbulencia se transfiere por la cascada de energía de turbulencia (Toapanta Ramos et al., 2019). La producción de “K” está vinculada al gradiente de velocidad, que es grande alrededor de la interfaz entre el agua y el aire, debido a la velocidad del aire. En Figura 23 se evidencia mayor energía de turbulencia en las zonas donde la velocidad aumentó.

Figura 23

Energía de turbulencia "K" vista en ParaView



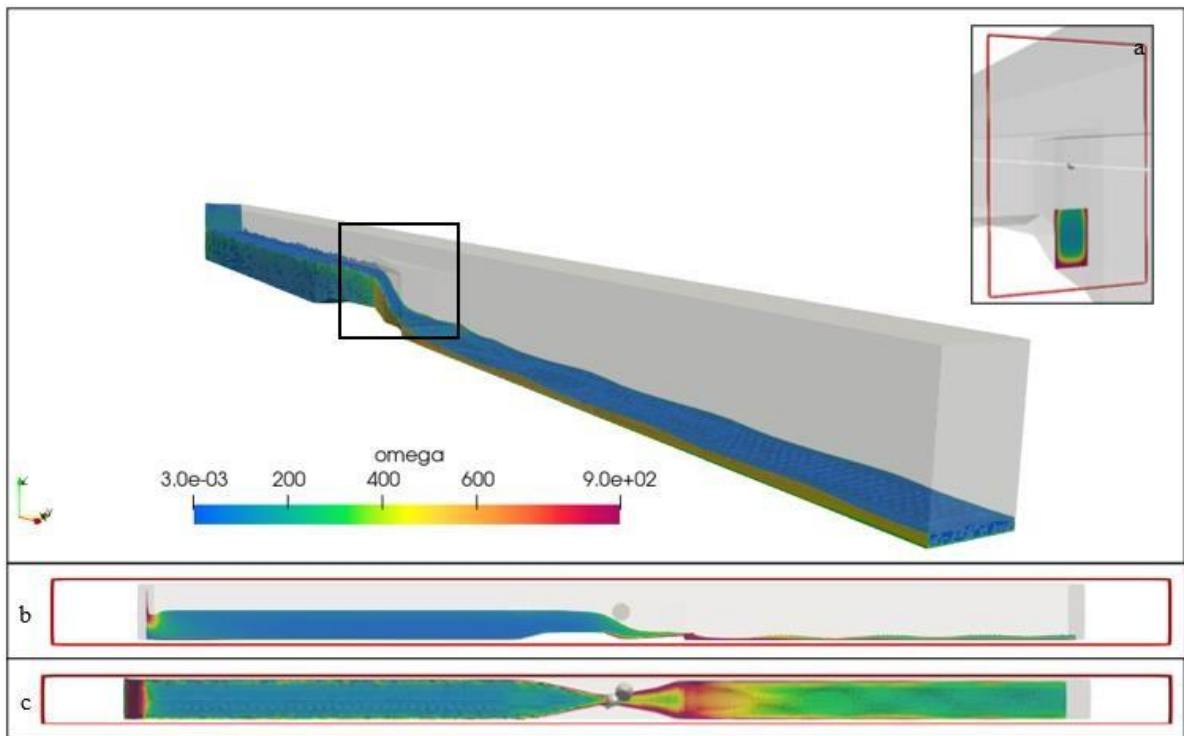
Nota: Vista en ParaView del campo “k”. Detalle de corte en X de “k” a mitad de la canaleta (a) en la parte inferior detalle del corte en y a mitad del canal (b) y el corte en z a 0.13cm (c).

La tasa de disipación específica “omega”. Está relacionada con la inversa de la escala de tiempo de la turbulencia. El modelo SST causa un importante amortiguamiento de las olas para evitar la propagación de las ondas de alta inclinación. Esta amortiguación es provocada por un

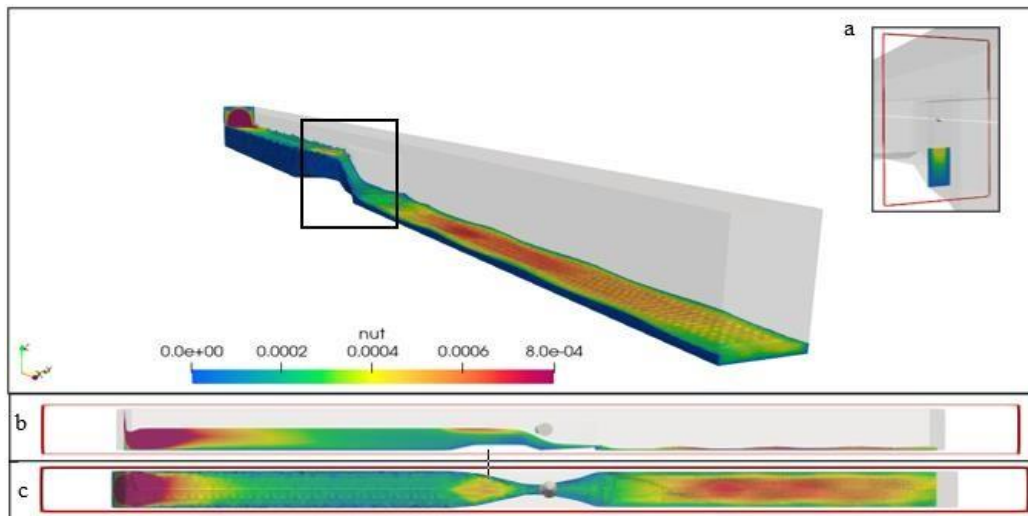
aumento de la viscosidad turbulenta alrededor del agua y el aire. Este aumento es inducido por la gran producción de energía cinética turbulenta “ k ” (Toapanta et al., 2019). En la Figura 24 se observa un aumento de disipación de energía de turbulencia en las zonas cerca de las paredes, a diferencia del campo de viscosidad de turbulencia “ ν_t ”, en la Figura 25 se evidencia un aumento de la viscosidad turbulenta en las zonas del centro donde aumentó la velocidad, esto debido a los valores elevados de la energía de turbulencia “ k ” en esas mismas zonas.

Figura 24

Disipación de energía de turbulencia “ Ω ” vista de ParaView

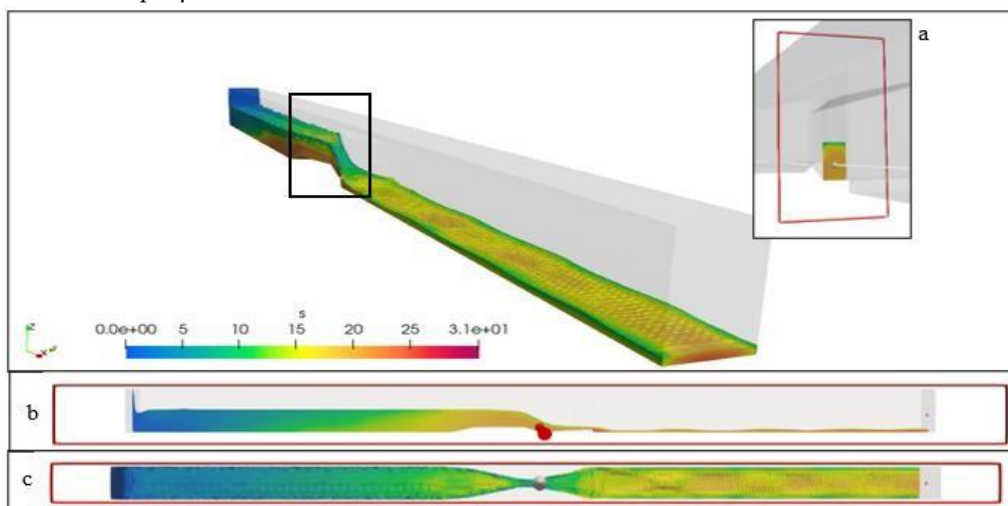


Nota: Vista en ParaView del campo “ Ω ”. Detalle de corte en X de “ Ω ” a mitad de la canaleta (a) en la parte inferior detalle del corte en y a mitad del canal (b) y el corte en z a 0.13 cm (c).

Figura 25*viscosidad de turbulencia “nut” vista de ParaView*

Nota: Vista en ParaView del campo “nut”. Detalle de corte en X de “nut” a mitad de la canaleta (a) en la parte inferior detalle del corte en y a mitad del canal (b) y el corte en z a 0.13cm (c).

La formulación de momento en interFoam está diseñada para producir un equilibrio discreto entre el gradiente de presión y la tensión superficial.

Figura 26*Tensión superficial “s” vista en ParaView*

Nota: Vista en ParaView del campo “s”. Detalle de corte en X de “s” a mitad de la canaleta (a) en la parte inferior detalle del corte en y a mitad del canal (b) y el corte en z a 0.13cm (c).

8. Impactos

La modelación en CFD de la canaleta Parshall abre la puerta a variables que pueden generar ciertos impactos en diferentes ámbitos mencionados a continuación:

Tabla 2
Impactos

Aspecto	Impacto	Supuesto	Plazo
Académico	Mayor interés por parte de la comunidad académica en cuanto a la dinámica computacional de fluidos y la hidráulica	Entender de forma práctica y visual el comportamiento dinámico de los fluidos utilizando TICs para su aprendizaje para generar interés en dichos temas por parte de la comunidad académica.	Corto
Científico	Aumento en la investigación de software de CFD y ensayo en canal hidráulico.	Conocimiento de la falta de la experiencia técnica en la región en este campo de la investigación, proporciona un mayor interés de la investigación de CFD's.	Mediano
Social	Incentivar a la implementación de nuevas herramientas para la gestión de los recursos hídricos en la región.	El conocimiento científico obtenido de diversas simulaciones CFD puede crear o actualizar herramientas para la optimización de la potabilización del agua, la gestión y mantenimiento de los recursos hídricos en la región, entre otros.	Largo
Técnico	Mejora y optimización del diseño de la canaleta Parshall.	Validar los resultados de los modelos de turbulencia matemáticos generados por la modelación en OpenFOAM.	Corto

Nota: Posibles impactos generados por la investigación.

9. Conclusiones

OpenFOAM Posee herramientas de compatibilización con otros preprocesadores (Salome, ANSYS, etc) y una gran cantidad de solucionadores dirigidos a resolver una amplia cantidad de problemas típicos (Mecánica de Fluidos, Transferencia de calor, etc) y con libertad de modificarlos. Debido a ser un *software* de acceso público de código abierto y gratuito, es preferido por la comunidad académica. La capacidad de revisar cada ecuación, algoritmo y parámetro en el código permite el mejor análisis posible basado en la física de los fenómenos. Igualmente, importante es la capacidad de modificar el solucionador existente o construir el suyo propio a partir de los existentes, que se puedan a adaptar a los diferentes tipos de flujos.

El objetivo principal de este estudio fue el examen numérico de la convergencia iterativa de la simulación del modelo CFD del movimiento del fluido en la mezcla rápida de un canal Parshall, por medio del modelo de turbulencia K- omega SST y el solucionador de OpenFOAM para fluidos *Multiphase* interFoam. Este estudio muestra que los resultados de un modelo de CFD dados por un software como OpenFOAM, puede brindar soluciones confiables a los problemas de diseño de canales Parshall para encontrar las especificaciones de diseño óptimas para diferentes escenarios como cambios de diseño para aumentar la eficiencia de los canales Parshall y optimizar los sistemas de tratamiento, proporcionando resultados con el menor costo en comparación con los métodos experimentales.

En este estudio, los datos de simulación con un caudal de 13 l/s logran la convergencia de la solución iterativa en la iteración 24401 se logra la estabilidad del modelo CFD, a las 8.15h de tiempo real de simulación, en general se logró residuales de 10^{-2} 10^{-3} de orden de magnitud, aceptados en la literatura para establecer que hay una convergencia matemática. Para el modelo la malla fue de 1.290.489 volúmenes finitos, los cuales eran de 15 cm de ancho en las zonas centrales del canal y 1cm cerca de las paredes con 5 subdivisiones de refinamiento.

10. Trabajos Futuros

Para validar los modelos matemáticos de la optimización de la canaleta Parshall para mezcla rápida, se podría construir un prototipo físico para comprar los datos de la modelación con datos reales de laboratorio, para poder calibrar el modelo matemático con el prototipo físico, mediante datos hidráulicos observados por medio de trazadores y sensores.

11. Referencias

- Álvarez, A. (2021). *Ecuaciones de Euler de fluidos incompresibles*. [Trabajo de Fin de grado Matemáticas: Universidad de Santiago de Compostela] https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/28770/%C3%81lvarez_L%C3%B3pez_Antonio.pdf?sequence=1
- Aponte, C. (2019). *Diseño y construcción de una canaleta parshall para el laboratorio de hidráulica de la universidad santo Tomás Sede central*. [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30431/2020carlosaponte.pdf>
- Autodesk. (27 de Agosto de 2018). *AUTODESK. SST K-Omega Turbulence Models*. <https://help.autodesk.com/view/SCDSE/2019/ENU/?guid=GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC>
- Carita, G. (12 de Noviembre de 2018). *Gidahatari*. Modelamiento de un Túnel de Ventilación con Malla Dinámica en OpenFoam - Tutorial: <https://gidahatari.com/ih-es/modelamiento-deun-tunel-de-ventilacion-con-malla-dinamica-en-openfoam>
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications* McGraw Hill.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004). *Tratamiento de aguas para consumo humano : plantas de filtración rápida. Manual II : diseño de plantas de tecnología apropiada*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). <https://es.scribd.com/document/414282434/Tratamiento-de-agua-para-consumo-humano-Plantas-de-filtracion-rapida-Manual-II-Diseno-de-plantas-de-tecnologia-apropiada-pdf#>
- Cortez Villada, P. M., Luna Romero, M., & Pacas Martínez, S. P. (2012). *Introducción a Blender: Manual de usuario*. Universidad de El Salvador.
- Cuenca Gaona, L. L. (2019). *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*. [Tesis de pregrado: Universidad Católica de Colombia] Repositorio. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/751bc944-ddb2-41fd-968fdd2ec3591fcb>

- Díaz Alarcón, A. G. (2020). *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]. Repositorio. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/29932>
- Espinosa, S., & Gaitan, D. (2018). *Desarrollo de software para el diseño hidráulico de canaleta parshall como estructura para mezcla rápida en el tratamiento del agua – caso aplicativo en municipios de la provincia del Alto Magdalena*. [Tesis de pregrado: Universidad Piloto de Colombia] Repositorio. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5751>
- Giraldo, A (2017). *Simulación Mediante Dinámica Computacional (CDF) de un Intercambiador de Flujo Cruzado*. [Tesis de pregrado, Universitat Politecnica de Catalunya]. Repositorio. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/117152/TFG_Giraldo_Vivas_Adria.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Greenshields, C. J. (2022). *Use Guide*. The OpenFOAM Fundation. [Archivo PDF] <https://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf>
- Haddadi, B., Jordan, C., & Harasek, M. (2019). *Basic Training and Tutorial Series OpenFOAM*. Washington DC: Chemical-engineering.at. <https://www.cfd.at/sites/default/files/tutorialsV7/OFTutorialSeries.pdf>
- Helmenstine, A. M. (9 de Octubre de 2019). *ThoughtCo* Law of Conservation of Mass: <https://www.thoughtco.com/definition-of-conservation-of-mass-law-604412>
- Heyrani, M., Mohammadian, A., & Nistor, I. (2021). Numerical Simulation of Flow in Parshall Flume Using Selected Nonlinear Turbulence Models. *Hydrology*, 8,151. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040151>
- Holman, J., Lloyd, J. (1995). *Computacional Fluid Dynamics The Basic With Applications*. McGraw-Hill.Inc. University of Maryland. <https://www.airloads.net/Downloads/Textbooks/Computational-Fluid-Dynamics-the-BasicsWith-Applications-Anderson-J-D.pdf>
- Julca Orrillo, J. C., & Terrones Estrada , J. E. (2020). *Modelamiento de la canaleta parshall*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Mantilla, W (2016). Estado del arte del agua y saneamiento rural En colombia. *Revista de ingeniería* 44, 46-54. <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/923/1101>

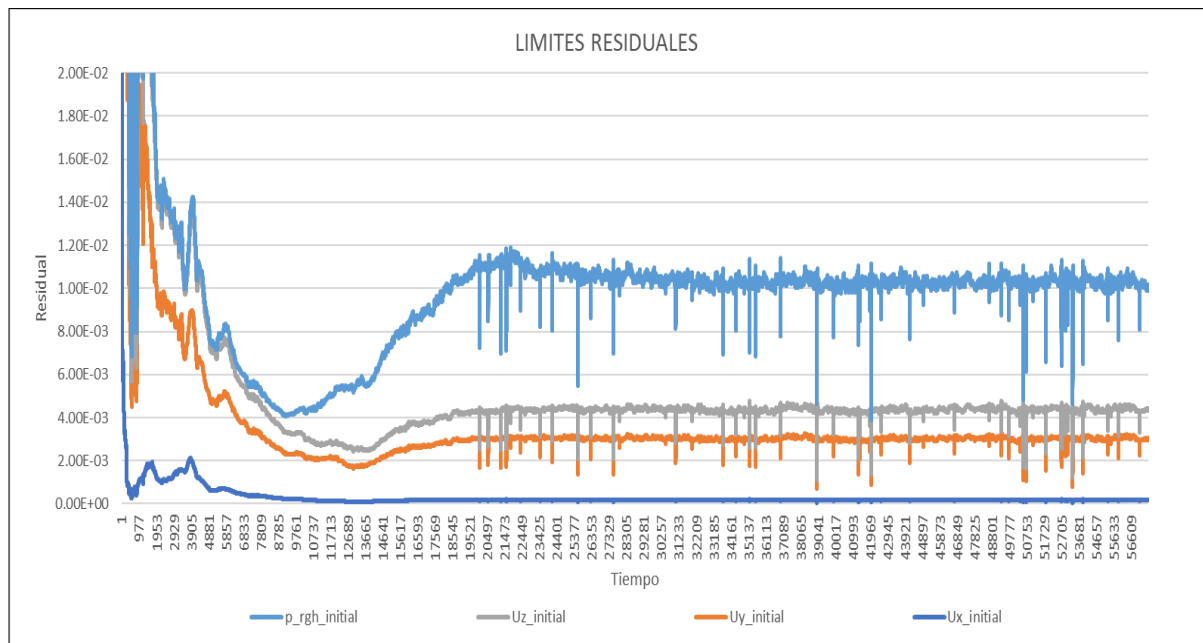
- Melo, D. A. (2018). *Análisis de Estrategia para la Separación y Caracterización de Flujos Multifase*. [Trabajo de grado]. Universidad Veracruzana. https://www.uv.mx/veracruz/miaplicada/files/2021/07/Tesis_Dulce-Azucena-Melo-Montes.pdf
- Mingjun Diao, L. J., Sun, H., & Ren, Y. (2018). Numerical Modeling of Flow Over a Rectangular Broad-Crested Weir with a Sloped Upstream Face. *Water*, 12. <https://doi.org/10.3390/w10111663>
- Mohammadian, A., Heyrani, M., Nistor, I., & Dursun, O. F. (2021). Numerical Modeling of Venturi Flume. *Hydrology*, 27. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010027>
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. Springer International Publishing Switzerland.
- Muñoz Barranco, J. (2015). *Evaluación de la eficiencia de métodos acoplados en la resolución de problemas fluidomecánicos con openfoam*. [Tesis de pregrado: Universidad de Jaén] <https://docplayer.es/112554856-Evaluacion-de-laescuela-politecnica-superior-de-jaen-eficiencia-de-metodos-acoplados-en-la-resolucion-deproblemas-fluidomecanicos-con-openfoam.html>
- Nasa. (1997). Computational Fluid Dynamics (CFD) Image of Hyper-X Research Vehicle at Mach 7 with Engine Operating. <https://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/X-43A/HTML/ED97-43968-1.html>
- Osses, J. (12 de Diciembre de 2016). *Blog ESSS*. <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>
- Quispe, I. (Noviembre de 4 de 2022). *ARCUX*. ¿Qué es la hidráulica de canales?: <https://arcux.net/blog/que-es-la-hidraulica-de-canales/>
- Richmond, G. (2019). *Modelos de turbulencia introductorio*. Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/modelos_de_turbulencia_introductorio.pdf
- TecQuipment. (2018). *Flow Channel FC3000 User Guide*.: TecQuipment.Ltd. <https://www.tecquipment.com/es/mecanica-de-fluidos/open-channel-flow/p3>
- Toapanta, L. F., Zapata, J. A., Cholango, A. I., Quitiaquez, W., Nieto Londoño, C., & Zapata, Z. (2019). *Estudio numérico y comparativo del efecto de turbulencia en codos y dobleces para*

- distribución de agua sanitaria*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad Pontificia Bolivariana, 18. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v28n53/01211129-rfing-28-53-00101.pdf>
- Villamizar, A. (2014). *Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal*. [Tesis de Magister: Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53225>
- Yep, L. (4 de Diciembre de 2021). *Ingeniería Básica*. Las Ecuaciones de Navier- Stokes: <https://ingenieriabasica.es/las-ecuaciones-de-navier-stokes/>

12. Anexos

Anexo 1

Limites residuales de los campos de presión y velocidad



Anexo 2

Límites residuales de los campos “s”, “omega” y “k”

