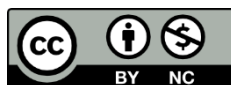


**TESIS DE APLICACIÓN EN TEMÁTICAS DE INGENIERÍA
“MODELACIÓN MEDIANTE SOFTWARE CFD DE LOS ENSAYOS DE
VERTEDERO RECTANGULAR Y TRIANGULAR DEL CANAL HIDRÁULICO
DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS,
SEDE VILLAVICENCIO”**



Por:
Andrés Germán Díaz Alarcón



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020**

**TESIS DE APLICACIÓN EN TEMÁTICAS DE INGENIERÍA
“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”**



Por:
Andrés Germán Díaz Alarcón

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional
de ingeniero civil

Aprobado por:
Ing. Iván Darío Acosta Sabogal, Mg. ©.
Director

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020**

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Fray José Gabriel Mesa Ángulo, O.P.
Rector General

Fray Eduardo González 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. Manuel Eduardo Herrera Pabón, MEng.
Decano Facultad de Ingeniería Civil

A Jacqueline, mi madre, quién cimentó lo que soy y lo que seré.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el apoyo de mi padre, mi abuela, y en general de toda mi familia por darme soporte durante los tiempos difíciles y por compartir los buenos. Han sido parte esencial en mi vida académica y estoy seguro que lo serán en la profesional.

Al Ingeniero Iván Acosta, por el apoyo y la confianza que ha puesto en mí, en este y otros retos. Por todas sus enseñanzas, paciencia y su amistad.

A mi *alma mater*, la Universidad Santo Tomás por brindarme las herramientas necesarias para mi desarrollo académico. En general a todos quienes brindaron su soporte y dirección para llevar a buen puerto el presente proyecto. A toda la comunidad *online* de CFD y de software libre.

“El agradecimiento es algo maravilloso. Hace que lo excelente de los demás nos pertenezca también”.
Voltaire.

RESUMEN

Se establece replicar en un modelo matemático de CFD los ensayos de vertedero rectangular y triangular del canal hidráulico del laboratorio de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio. Con el fin de establecer el software sobre el cuál se realizarían las modelaciones se revisaron las ofertas del mercado y, de estos, se seleccionó OpenFOAM por generar mejores prestaciones para los propósitos académicos.

Se fijaron las condiciones de frontera y variables a modelar a partir de los ensayos y se determinó no incluir las condiciones de vorticidad por limitaciones de los recursos de cómputo. Tras el análisis comparativo de los resultados de las modelaciones y los ensayos, se observó que los valores de las alturas de láminas de agua distan mínimamente unos de los otros; esta variación se debe a la calidad del mallado trabajado. En cuanto la revisión de las presiones y desplazamientos de la masa de agua se encontraron diferencias relacionadas con el control de los caudales, pues, en el canal del laboratorio los valores fluctúan en los tiempos iniciales hasta converger en el caudal establecido; mientras que en las modelaciones el caudal es fijo desde el tiempo cero.

Palabras Clave: *Dinámica de Fluidos Computacional, CFD, vertedero rectangular, vertedero triangular, canal hidráulico, OpenFOAM.*

ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics (CFD), allows the solution of complex mathematical fluid problems, helped from the computer science. It is established to replicate in a mathematical model of CFD the tests of the rectangular weir and V-notch weir for the hydraulic channel of the laboratory of the Universidad Santo Tomás, Villavicencio headquarters. In order to establish the software on which the modeling would be carried out, the market offers were reviewed and, from these, OpenFOAM was selected for generating better benefits for academic purposes.

The boundary conditions and variables to be modeled from the tests were established and it was determined not to include the vorticity conditions due to limitations of the computing resources. After comparative analysis of the results of the modeling and the tests, it was observed that the values of the heights of sheets of water are minimally distant from each other; this variation is due to the quality of the mesh worked. Regarding the revision of the pressures and displacements of the water mass, differences related to the control of the flows were found, since, in the laboratory channel, the values fluctuate in the initial times until they converge in the established flow; while in the models the flow is fixed from zero time.

Key Word: *Computational Fluid Dynamics, CFD, rectangular weir, V-notch weir, hydraulic channel, OpenFOAM.*

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	11
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
3.	JUSTIFICACIÓN.....	13
4.	OBJETIVOS.....	14
4.1.	OBJETIVO GENERAL.....	14
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
5.	ALCANCE.....	15
6.	MARCO DE REFERENCIA	16
6.1.	MARCO TEÓRICO	16
6.1.1	Dinámica de Fluidos Computacional.....	16
6.1.2	Método de los Volúmenes Finitos	18
6.1.3	Ecuaciones de la Conservación de Movimiento en Fluidos	20
6.1.4	Ecuaciones de Navier-Stokes	21
6.1.5	Algoritmos SIMPLE, PISO y PIMPLE.....	21
6.1.6	Vertederos y Ecuación del Vertedero.....	25
6.1.7	Canal Hidráulico para Ensayos	26
6.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	27
6.3.	ESTADO DEL ARTE.....	27
7.	METODOLOGÍA	29
7.1.	ETAPA 1: REVISIÓN, ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SOFTWARES CFD. ...	30
7.2.	ETAPA 2: SIMULACIONES, PRUEBAS DE LABORATORIO Y SIMULACIONES:.....	30
8.	ETAPA 1: REVISIÓN, ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SOFTWARES CFD. 31	
9.	ETAPA 2: PRUEBAS DE LABORATORIO, SIMULACIONES Y OBTENCIÓN DE DATOS.	34
9.1.	PRUEBAS DE LABORATORIO.....	34
9.2.	CONSTRUCCIÓN DE LAS MALLAS.....	36
9.3.	DEFINICIÓN DEL SOLVER.....	39
9.4.	DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA	39
9.5.	SIMULACIÓN Y TIEMPOS DE SIMULACIÓN.....	42
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
10.1.	ALTURA DE LAS LÁMINAS DE AGUA Y ALCANCE DE LOS FILOS.	44
10.2.	VARIACIONES DE PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	48
10.3.	DESPLAZAMIENTO DE LA MASA DE AGUA.....	50
11.	RESULTADOS E IMPACTOS	53
11.1.	RESULTADOS	53
11.2.	IMPACTOS	54
12.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	55
12.1.	CONCLUSIONES	55
12.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	55
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 8-1: Relación comparativas para los softwares ANSYS, OpenFOAM y Autodesk CFD.....	32
Tabla 9-1: Puntos coordenados del canal.	37
Tabla 9-2: Condiciones de Borde.	39
Tabla 9-3: Valores de Viscosidad Cinemática y Densidad.	42
Tabla 9-4: Características del equipo de cómputo.	43
Tabla 9-5: Tiempos de cómputo de las modelaciones.	43
Tabla 10-1: Relación de valores del ensayo y modelación para el vertedero rectangular.	47
Tabla 10-2: Relación de valores del ensayo y modelación para el vertedero triangular.	47
Tabla 10-3: Desplazamiento temporal de la masa de agua para el ensayo y laboratorio de vertedero rectangular.	51
Tabla 10-4: Desplazamiento temporal de la masa de agua para el ensayo y laboratorio de vertedero triangular.	52
Tabla 11-2: Resultados.	53
Tabla 11-2: Posibles Impactos Generados.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 6-1: Diagrama interdisciplinar de la Dinámica de Fluidos Computacional..	16
Figura 6-2: Modelación CFD de monoplaza Ferrari SF71H 2018.	17
Figura 6-3: Procesos modelación software CFD. Fuente: Autor.	18
Figura 6-4: Aplicación del Método de Volúmenes Finitos a un elemento tipo caja	19
Figura 6-5: Algoritmo SIMPLE.....	22
Figura 6-6: Algoritmo PISO.	23
Figura 6-7: Algoritmo PIMPLE.....	24
Figura 6-8: Diagrama análisis ecuación de energía en vertedero.	25
Figura 6-9: Elementos que componen el canal para ensayos hidráulicos.....	26
Figura 7-1: Metodología para el desarrollo.....	29
Figura 8-1: Herramientas complementarias para OpenFOAM.	33
Figura 9-1: Accesorios del FC300 para ensayo de vertederos.....	34
Figura 9-2: Montaje para ensayos de vertedero.....	35
Figura 9-3: Montaje del tablero de presiones.	35
Figura 9-4: Definición de caudales para vertederos	35
Figura 9-5: Lecturas del flujómetro.....	35
Figura 9-6: Planos referenciados del canal y puntos coordinados.	36
Figura 9-7: Geometría del canal.....	37
Figura 9-8: Mallado del canal	38
Figura 9-9: Cantidad de elementos de los mallados.	38
Figura 9-10: Directorios y fichero para <i>interFoam</i>	40
Figura 9-11: Transformación del mallado.....	41
Figura 10-1: Mediciones realizadas en el ensayo y modelación de vertedero rectangular.	45
Figura 10-2: Mediciones realizadas en el ensayo y modelación de vertedero triangular.	46
Figura 10-3: Distribución de los piezómetros.	48
Figura 10-4: Graficas presión contra tiempo de los ensayos de laboratorio.....	49
Figura 10-5: Graficas presión contra tiempo de las modelaciones.....	49
Figura 10-6: Graficas caudal contra tiempo de las modelaciones.....	50
Figura 10-7: Comparaciones temporales de los ítems para el vertedero rectangular.	51
Figura 10-8: Comparaciones temporales de los ítems para el vertedero triangular.	52

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos físicos están regidos bajo diferentes leyes, teoremas y postulados que son universales, y, que a través de los años la mayoría se han podido modelar matemáticamente. Dichas modelaciones permiten pronosticar comportamientos basados en la interpretación de resultados numéricos obtenidos a partir ecuaciones o sistemas de ecuaciones complejos. Por otra parte, algunos comportamientos físicos son escalables, es decir que, a partir de modelos reducidos se pueden obtener resultados similares a los ocurridos en el terreno real.

El manejo de los fluidos, como líquidos o gases, se ha convertido en una de las principales actividades en diferentes industrias, lo que ha llevado al desarrollo del conocimiento de sus comportamientos físicos [1]. La mecánica de fluidos, como rama de la física, ha pretendido durante años el estudio y desarrollo de modelos matemáticos que describan los comportamientos de los fluidos, tanto en reposo como en movimiento [2].

En la ingeniería hidráulica, uno de los tipos más comunes de flujos descritos por la dinámica de fluidos, es el flujo turbulento. Dicho tipo de comportamiento es común en los transportes de agua a flujo libre, como los canales, ya que propician condiciones asociadas con un número de Reynolds de magnitud considerable, aleatoriedad del flujo, vorticidad, entre otros [3]. Este tipo de comportamientos puede ser descrito con la ecuación no lineal parcial diferencial de Navier-Stokes que sostiene relación directa con las ecuaciones de conservación de masa, conservación de energía y conservación de cantidad de movimiento [4].

Con el fin de analizar de manera eficiente los valores de los ensayos de vertedero en el canal hidráulico del laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio, se propone realizar la modelación matemática de los mismos a través de un software desarrollado bajo la rama de la Mecánica de Fluidos, denominada como *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, que consiste en utilizar las ciencias de la computación, las técnicas numéricas y las interfaces gráficas para resolver los problemas físicos relacionados con el movimiento de los fluidos [4].

Para el caso, se modelan dos ensayos de vertedero de diferentes geometrías en los cuales se analizan y contrastan la interacción de la masa de agua con el canal y el vertedero en función del tiempo, con sus similares en los resultados de la modelación matemática. Para realizar la mencionada modelación se hace necesario realizar la evaluación de diferentes softwares *CFD* en términos de interactividad, confiabilidad, necesidad de recursos y presentación de resultados, con el objeto de seleccionar la opción más propicia para las modelaciones.

Tras llevar a cabo la correcta modelación, obtención e interpretación de los resultados, se realiza un análisis comparativo que contrasta los resultados con el ensayo par en el canal hidráulico, así evaluando los parámetros del modelo matemático aplicados y su correspondencia el comportamiento real.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El conocimiento de los comportamientos dinámicos de los fluidos a flujo libre es esencial en el desarrollo de obras hidráulicas de Ingeniería Civil, ya que es uno de los métodos más comunes para transportar agua de forma artificial y es la forma en la que los cuerpos fluviales lo hacen, en condiciones naturales. A su vez, dicho conocimiento es obtenido a través del estudio teórico de la dinámica de fluidos y la experimentación en ensayos de laboratorio que permitan recrear de la manera más precisa, en cuanto sea posible, los fenómenos que ocurren en la escala real [2]. Experimentos en los cuales los resultados sean muy cercanos a la realidad colaborarán en gran medida a entender de la mejor manera los comportamientos en las obras hidráulicas.

La obtención del canal hidráulico por parte de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio, para el laboratorio de hidráulica del Campus Aguas Claras, abre las puertas al desarrollo del conocimiento sobre variados fenómenos de los cuales se pueden realizar ensayos en dicho equipo. El uso de canal permite el aprendizaje de la dinámica de fluidos, análisis de comportamientos en diferentes condiciones (variaciones de caudales, pendientes, interacción con diferentes accesorios, entre otras), el desarrollo y fomento de la investigación y la comprobación de fenómenos reales.

En contra parte, el desarrollo del poder de computación ha permitido llevar el estudio de la física en general del campo tangible a virtualidad. La capacidad de desarrollar ecuaciones complejas a través de algoritmos a altas velocidades de iteración permite la inclusión de cada vez más variables, ayudando a refinar los modelos matemáticos. Aunado a la velocidad de computación de los modelos matemáticos, la posibilidad de representar gráficamente de forma realista los fenómenos evaluados y en algunos casos la reducción de recursos utilizados, hacen más eficiente el desarrollo experimental de la investigación de forma virtual.

Con el desarrollo del presente trabajo de grado se pretende analizar las diferentes variables que intervienen en la modelación del ensayo de vertederos de un canal hidráulico, en un software *CFD*, para llegar a un comportamiento lo más cercano a la realidad con la mayor eficiencia de recursos. Se tiene en cuenta, por ejemplo, los softwares para la modelación, las variables de la dinámica de fluidos a incluir en el modelo, la necesidad de recursos de computación y el tiempo de la misma, los resultados y sus representaciones, entre otros.

Es necesario acercar más a los estudiantes a la utilización de la matemática computacional como herramienta para la investigación, especialmente en el manejo de los recursos hídricos. La utilización de este tipo de software se hace tediosa o en algunos complicada debido a la escasez de información clara en cuanto a los procesos para llevar a cabo una modelación como la que da lugar a este documento.

3. JUSTIFICACIÓN

Villavicencio y la región de los Llanos Orientales es una de las más ricas en cuanto recursos hídricos se refiere, y también una de las regiones con uno de los peores manejos de los mismos. En parte por la falta de conocimiento e investigación en la materia [5]. Con el fin de promover la investigación en temas inherentes a los recursos hídricos, la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio, y la Facultad de Ingeniería Civil en el año 2017 tomaron la decisión de adquirir un equipo en el cual se pudieran modelar diferentes fenómenos de la mecánica de fluidos, y así, promover la investigación y el desarrollo del conocimiento en esta área.

Tras el respectivo análisis, la Facultad de Ingeniería Civil, optó por la adquisición de un canal hidráulico de pendiente variable, del modelo FC300, fabricado por la firma británica TecQuipment Ltd. Dicho canal fue instalado en el periodo 2018-I, en el laboratorio de hidráulica del campus Aguas Claras, y calibrado por especialistas provenientes de la casa matriz del fabricante. El canal cuenta con diferentes accesorios que permite la realización de diferentes ensayos como el de vertedero con diferentes geometrías del mismo.

Desarrollar la investigación sobre la mejora del manejo de los recursos hídricos a través de experimentación virtual, como es el ejemplo del uso de software *CFD*, ayuda significativamente en la reducción de recursos. También, disminuye la complejidad en la percepción de algunos fenómenos, favorece el análisis de las variables que afectan los comportamientos a modelar, posibilita la variación rápida de las condiciones de frontera, entre otros beneficios [1].

Facilitar el entendimiento sobre la preparación de los elementos necesarios, el ajuste de los parámetros, la correcta utilización de los comandos para la ejecución del software, la forma de presentación de los resultados, entre otros, ayudará a la futura realización de otros modelos dentro de futuras investigaciones relacionadas al área de la ingeniería hidráulica.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Modelar matemáticamente, a través del uso de software *CFD*, las condiciones de flujo libre de agua en los ensayos de vertedero rectangular y vertedero triangular del Canal Hidráulico del laboratorio de hidráulica del Campus Aguas Claras de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar tres (3) software *CFD*, con el fin de seleccionar la opción más viable que permita realizar la modelación de los ensayos bajo parámetros de accesibilidad a la licencia, fiabilidad de los resultados, estética de la representación gráfica de los resultados y demás que resulten necesarios en la evaluación.
- Realizar la modelación matemática basada en la Dinámica de Fluidos, en el software *CFD* seleccionado, las condiciones de los ensayos de vertedero rectangular y vertedero triangular de la manera más cercana a la realidad que permitan los recursos.
- Analizar y presentar los resultados obtenidos a partir de la modelación, resaltando el comportamiento de las variables en el tiempo, de manera similar al ensayo real al realizado en el Canal Hidráulico.

5. ALCANCE

El alcance del presente trabajo de grado se establece principalmente en realizar la modelación del ensayo de vertedero en un software *CFD*, donde se puedan establecer resultado de diferentes variables como velocidad de flujo, presiones, alturas de láminas de agua en función del tiempo y con flujo continuo. La medición de las mencionadas variables permitirá realizar una comparación con las lecturas de las mismas en la realización del ensayo en el canal hidráulico.

Se realiza un completo análisis de los parámetros requeridos para una modelación basada en la Dinámica de Fluidos Computacional, desde el análisis de las ecuaciones que rigen las modelaciones, como las ecuaciones de Navier-Stokes, los modelos turbulentos, algoritmos de solución; las secuencias procedimentales en las que se realizan los modelos, la selección dentro del catálogo de softwares disponibles y la mejor forma de presentar los resultados de las modelaciones.

Por otra parte, analiza el tiempo de computación necesario, teniendo en cuenta el hardware utilizado, con relación a la calidad del mallado y la geometría, el rango temporal a analizar y las variables incluidas.

Adicionalmente, se elaborará material audiovisual del procedimiento de la modelación desde su etapa de preproceso hasta la presentación de los resultados y, de la misma forma, del ensayo real en el canal a fin de permitir de manera más fácil apreciar la relación entre estos.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

6.1.1 Dinámica de Fluidos Computacional

La dinámica de fluidos computacional o *CFD* (siglas en inglés de *Computational Fluid Dynamics*), es una rama de la Mecánica de Fluidos que nace a raíz de la búsqueda de soluciones de los modelamientos matemáticos, apoyados en el poder de cálculo computacional, de los comportamientos físico dinámicos de los fluidos [1] [6].

Los modelos matemáticos utilizados para la representación de los fenómenos físico-dinámicos de los fluidos no resultan en expresiones analíticas, por ser ecuaciones diferenciales donde intervienen múltiples variables [7]. Dichos modelos matemáticos deben ser solucionados mediante algoritmos que requieren de un amplio número de iteraciones para llegar a valores que satisfagan significativamente las variables incluidas [8].

Por lo tanto, los requerimientos para llegar a las soluciones de los mencionados modelos dependen de forma directa de la capacidad de cálculo para realizar las mencionadas iteraciones [1]. En este punto es donde se hace necesario la utilización de las ciencias de la computación. Es así como se entiende que la dinámica de fluidos computacional es una herramienta derivada de la interacción interdisciplinaria (Figura 6-1).

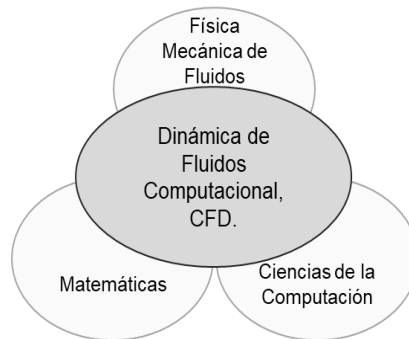


Figura 6-1: Diagrama interdisciplinario de la Dinámica de Fluidos Computacional.
Autor: Elaboración Propia.

Los softwares *CFD* han permitido la modelación de variados fenómenos donde intervienen fluidos como la interacción de estos con elementos sólidos, la interacción con otros fluidos con diferentes características, modelos termodinámicos, modelos de conducción eléctrica, modelos de combustión, entre otros [7].

Actualmente, la dinámica de fluidos computacional es demandada tanto en el campo científico como en la industria. La capacidad para realizar múltiples ensayos de manera virtual sin necesidad de realizar complicados, peligrosos o costosos montajes son algunas de las ventajas que han podido sacar los investigadores desde la academia [6].

Igualmente, la industria ha sacado gran partida de la *CFD*. Por ejemplo, industrias como la aérea, aeroespacial, militar, automovilística, realizan modelaciones de aerodinámica de autos, cohetes, aviones, entre otros. Igualmente, la modelación de sistemas de refrigeración y comportamiento térmico para dispositivos electrónicos en la industria de la tecnología. Y por supuesto, en la industria de la construcción en la modelación de elementos que conduzcan fluidos como redes de acueductos, gasoductos, oleoductos, canalizaciones [9]; interacción de estructuras con fluidos como en los pilares de puentes o el viento con los rascacielos.

Como ejemplo de la eficiencia que se puede lograr con *CFD*, la Figura 6-2 muestra la modelación realizada por la Scuderia Ferrari de su vehículo SF71H, con el que disputó el campeonato F1 de 2018. Los equipos de Formula 1 prueban la aerodinámica de sus monoplazas en túneles de viento, del cual solo disponen unas pocas horas por restricciones de la FIA¹. Para lograr un uso eficiente de este ensayo realizan múltiples modelaciones previas en *CFD*, sabiendo, entonces, en donde centrar los esfuerzos cuando se les permite el uso del túnel de viento.

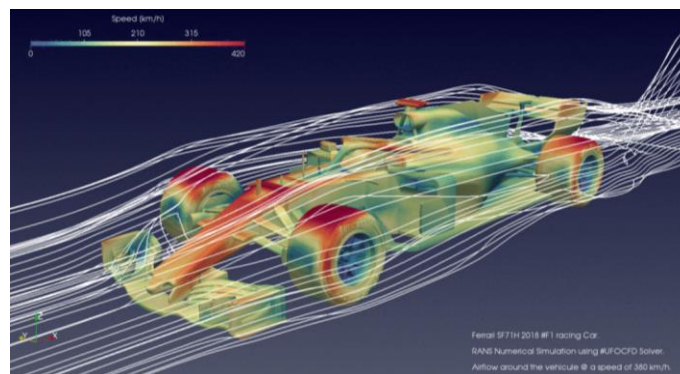


Figura 6-2: Modelación *CFD* de monoplaza Ferrari SF71H 2018.
Autor: Tomado de ferrari.com/formula1/sf71h

El desarrollo de una modelación en los softwares *CFD* tienen un proceso que es genérico y secuencial para todos los modelos que se pueden generar [7] (Figura 6-2). La primera parte se conoce como ‘preproceso’, donde se establecen las condiciones de frontera que tendrá la modelación como la geometría de los sólidos a través de malla, las variables que se pretenden analizar y los límites que tendrá el montaje, como por ejemplo el espacio temporal.

¹ *Federation Internationale de l'Automobile*: Federación internacional de automovilismo.

El segundo es el ‘solver’ donde se plantean y se da solución al modelo matemático planteado por medio de los algoritmos e iteraciones hasta llegar a los límites establecidos en la anterior etapa. Y, por último, el ‘postproceso’ donde se realiza la presentación de los resultados, que inicialmente son matrices, pero se pueden representar por medio de gráficos en función del tiempo de acuerdo a las variables establecidas [7].

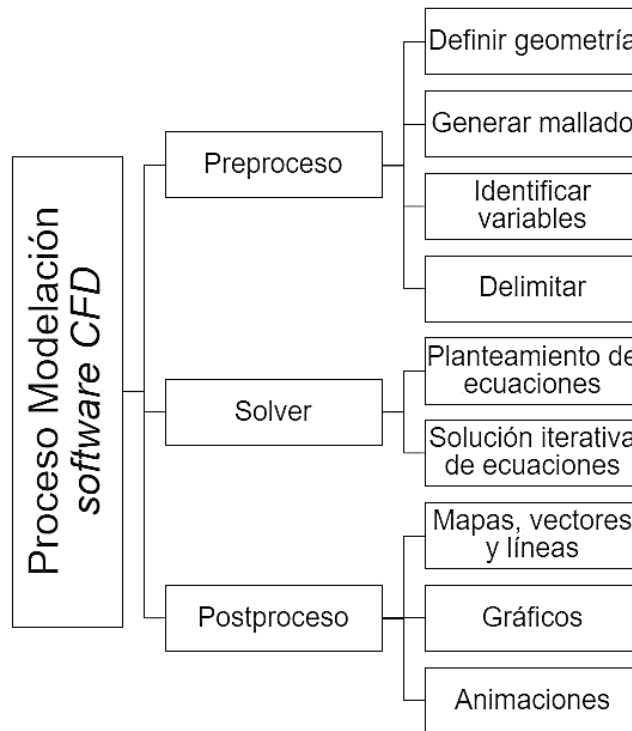


Figura 6-3: Procesos modelación software CFD.
Fuente: Autor.

6.1.2 Método de los Volúmenes Finitos

Uno de los principales problemas en la comprensión de la física macroscópica, es la generación de modelos matemáticos para sistemas complejos que tienen características continuas, para lo cual, se hace necesario convertir esos sistemas continuos en espacios discretos. La discretización de elementos permite realizar una aproximación a la modelación matemática de los comportamientos físicos que se quieren analizar [10]. En otras palabras, el método de elementos finitos permite dividir un sistema que esté compuesto por elementos de tendencia infinita en un elemento con fracciones contables, o finitas [7].

El método de los volúmenes finitos hace parte del método de elementos finitos, donde, para elementos tridimensionales se realiza fracciones en secciones

tetraédricas (Figura 6-4 b) o hexaédricas (Figura 6-4 c). Los volúmenes generados con hexaedros tienen la bondad de poder realizar mejor ajuste a geometrías complejas no ortogonales [11].

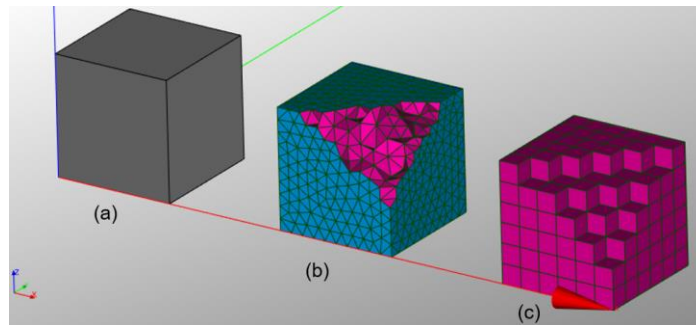


Figura 6-4: Aplicación del Método de Volúmenes Finitos a un elemento tipo caja con (a) sólido, (b) volúmenes tetraédricos, (c) volúmenes hexaédricos.

Autor: Elaboración propia – Salome 9.4.0.

La descomposición de esta geometría se establece en integrales de volumen que describen ecuaciones diferenciales que ajusten la geometría de base, como lo proponen LeVeque y Randall [11]. Sin duda, una de las ventajas más notorias del Método de Volúmenes Finitos es su característica de ser una discretización conservativa, es decir, que los fenómenos que afectan a una de las fracciones se distribuyen junto con el resto de volúmenes, como sucede en el sistema general [1].

Es indispensable tener en cuenta que existe una relación directamente proporcional entre la cantidad de volúmenes de control y la cantidad de recursos de computación necesarios para desarrollar una modelación. Por otra parte, la cantidad de volúmenes de control generados para el modelo influyen en la calidad de los resultados. Las modelaciones con pocos volúmenes de control pueden generar márgenes altos de error en los resultados de las modelaciones. Los modelos con altas densidades de volúmenes finitos necesitan un alto poder de cómputo o pueden ser demasiado lentos en su solución [7].

Para la modelación de fluidos, entre otros, es necesario establecer condiciones de borde o de frontera para los elementos que componen el sólido con el que interactuará dicho fluido. Esto ayuda a establecer el punto de partida de las ecuaciones que gobiernan el modelo. En general, se puede establecer, como mínimo para este tipo de modelaciones las condiciones de frontera [7]:

- *Inlet*: Es el elemento de partida de donde empieza a fluir el sólido o líquido a analizar. En esta condición de frontera se puede establecer, por ejemplo, el caudal o velocidad de entrada.
- *Outlet*: Esta condición de frontera establece el punto de salida, si así lo requiere la modelación, del fluido.
- *Wall*: Son los elementos sólidos con los que interactúa el fluido en la modelación. Se establece como paredes sólidas e impermeables.

6.1.3 Ecuaciones de la Conservación de Movimiento en Fluidos

Conservación de masa

La ley de conservación de masa, o ecuación de continuidad, es la relación directa entre la cantidad de masa que entra a un sistema con la que sale del mismo. Lo anterior, teniendo en cuenta que la masa no se crea ni se destruye en condiciones generales. Para estos efectos, la ecuación describe la derivada del teorema de Gauss [4].

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\vec{v}) = 0$$

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 [4]. 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:

$$\nabla(\vec{v}) = 0$$

Indicando así, la adivergencia del flujo incompresible.

Conservación de Momento

A partir de la ley de movimiento Newton aplicada a elemento infinitesimales, y entendiendo que los fluidos están gobernados por tres fuerzas, gravitacional, viscosas y de presión, tenemos que la relación de deformación de los fluidos Newtonianos es proporcional a la fuerza gravitacional y el esfuerzo cortante [2] [9], como:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i$$

Esta es la ecuación de momentum de Cauchy. El termino τ_{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 [2], donde el esfuerzo cortante se tiene como:

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

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 [2] [8].

Ecuaciones de Conservación de la Energía

Como se establece en [6], a partir de 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,

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

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 [12].

6.1.4 Ecuaciones de Navier-Stokes

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 [13], 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:

$$\begin{aligned} \nabla(\vec{v}) &= 0 \\ \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} &= -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau_{ij} \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{v}E) &= \nabla \cdot (k \nabla T) + p \vec{g} + \nabla \cdot (\vec{\sigma} \cdot \vec{v}) + \dot{W}_f + q_H \end{aligned}$$

Las ecuaciones Navier-Stokes son, en conjunto, el sistema que describe el comportamiento del flujo. 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 [1].

6.1.5 Algoritmos SIMPLE, PISO y PIMPLE

Dada la complejidad de las ecuaciones que implica el desarrollo de modelaciones de la dinámica de fluidos, se requiere la utilización de algoritmos para alcanzar la solución más analítica posible.

Algoritmo SIMPLE

Patankar y Spalding, en 1972, establecieron el procedimiento de cálculo para describir un flujo parabólico en tres dimensiones en [14]. Este procedimiento se estableció posteriormente como el algoritmo SIMPLE, método semi-implícito para vincular las ecuaciones de presión, para la solución de transferencia de calor y flujos tridimensionales [15].

Como se supone, las ecuaciones que intervienen en la solución de flujos tridimensionales, deben ser establecidas en función de los tres ejes. La Figura 6-5 hace un resumen esquemático del algoritmo SIMPLE.

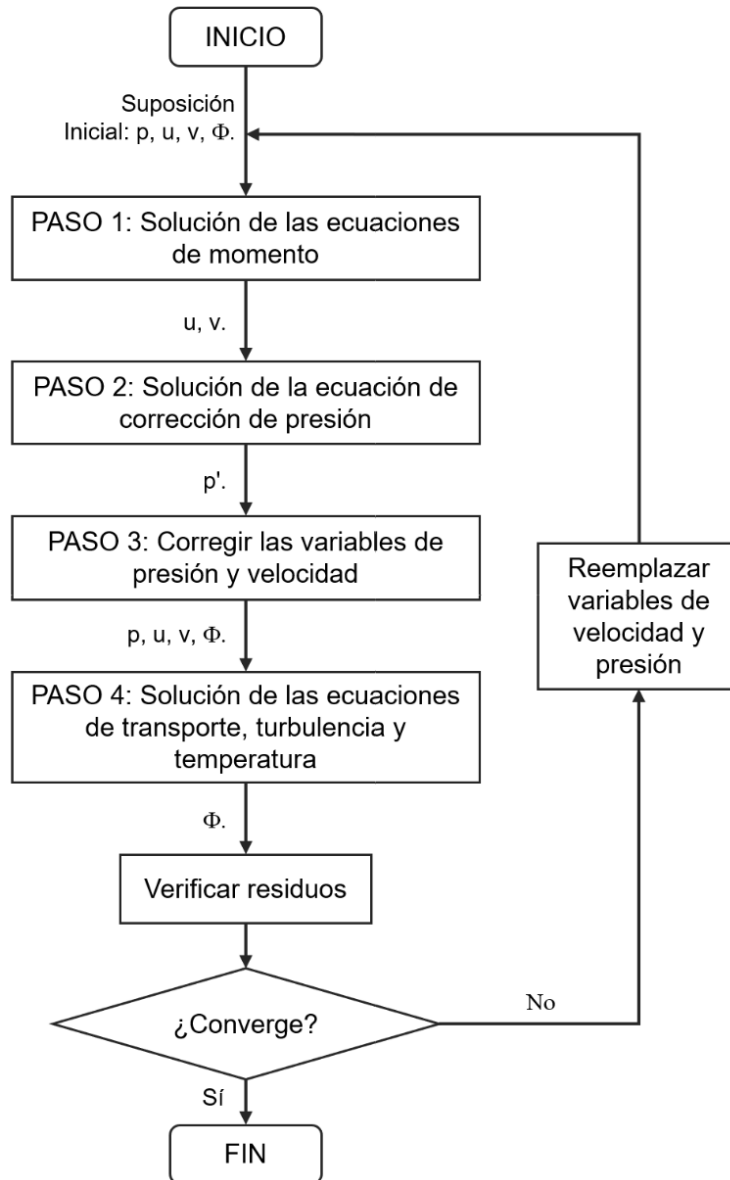


Figura 6-5: Algoritmo SIMPLE.
Autor: Elaboración propia basado en [14].

Algoritmo PISO

El algoritmo PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*), propuesto por Issa en 1985 en [16], está basado en el algoritmo SIMPLE, pero realizando un ajuste más de presión dentro de su estructura. Realizar un ajuste adicional repercute directamente en la reducción del tiempo de procesamiento, esto debido a que se hacen dos correcciones en una iteración [7], como se puede ver en Figura 6-6.

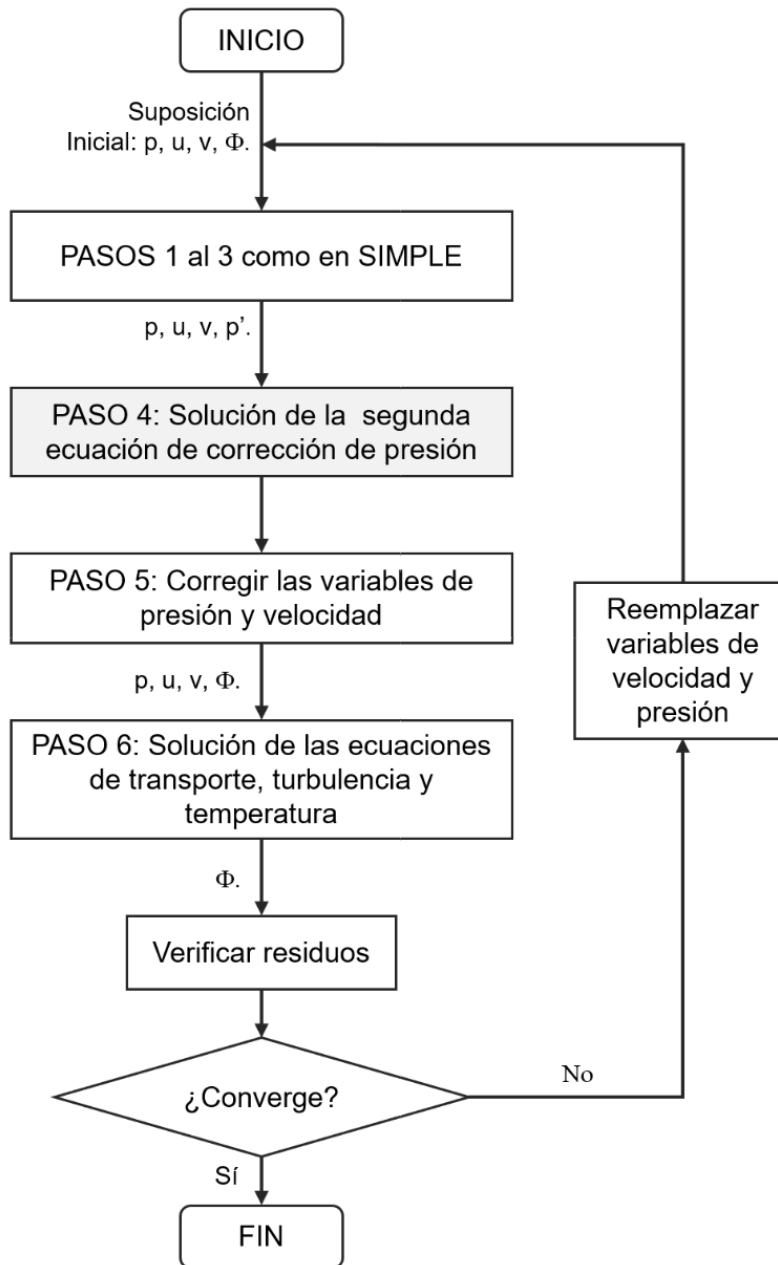


Figura 6-6: Algoritmo PISO.
Autor: Elaboración propia basado en [17].

Algoritmo PIMPLE

Como se puede inferir, el algoritmo PIMPLE, corresponde a una combinación de los algoritmos SIMPLE y PISO [12]. Este algoritmo permite fijar un valor de número de iteraciones de corrección de presión antes de dar solución a las ecuaciones de transporte. En la Figura 6-7, se esquematiza el algoritmo PIMPLE, incluyendo el número de iteraciones de corrección de presión como ‘nCorr’.

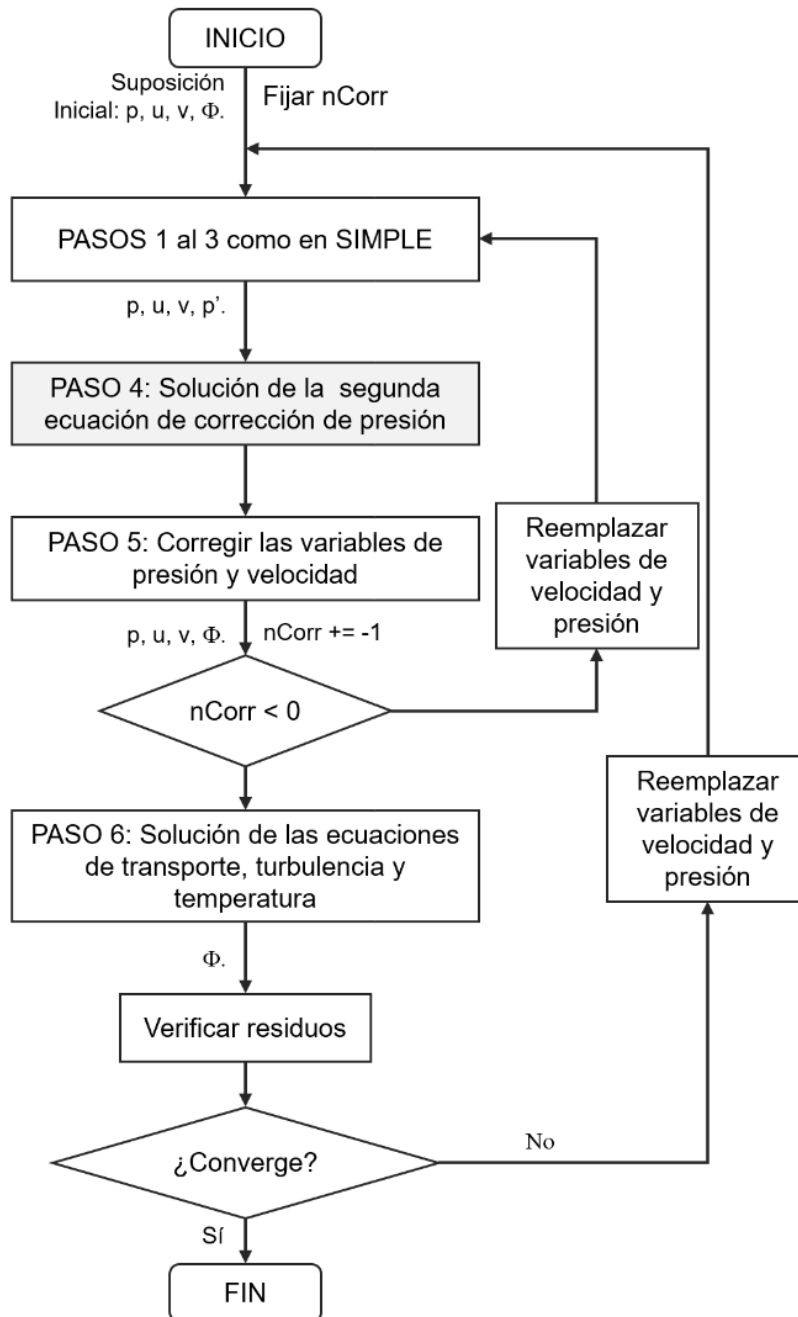


Figura 6-7: Algoritmo PIMPLE.
Autor: Elaboración propia.

6.1.6 Vertederos y Ecuación del Vertedero

Los vertederos son estructuras hidráulicas construidas, entre otros, para controlar medir el caudal y controlar el nivel del agua en reservorios o canales abiertos [14]. Las geometrías son variadas de acuerdo a la necesidad en cuanto a la relación de alturas inundación y caudal que pasa, siendo las formas rectangulares las más comunes por la proporcionalidad de estas variables.

A partir de la ecuación de la energía de Bernoulli, y realizando análisis de un punto aguas arriba del vertedero y otro sobre el mismo (Figura 6-5), teniendo en cuenta la ecuación de flujo volumétrico, obtenemos la ecuación para el cálculo del caudal del vertedero con contracciones que está en función de un coeficiente de descarga, al ancho efectivo del vertedero y la altura de la lámina de agua, aguas arriba del vertedero [3].

$$Q = \frac{2}{3} Cd \left(L - \frac{2h}{10} \right) \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}}$$

De la misma forma, en cuanto a ecuaciones de partida se refiere, se puede establecer la ecuación para para el caudal de descarga de una estructura de vertedero triangular, expresado como

$$Q = \frac{8}{15} Cd \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} h^{\frac{3}{2}}$$

Las ecuaciones de vertedero están referidas de la ecuación de Bernoulli a través del anterior análisis que corresponde al siguiente diagrama:

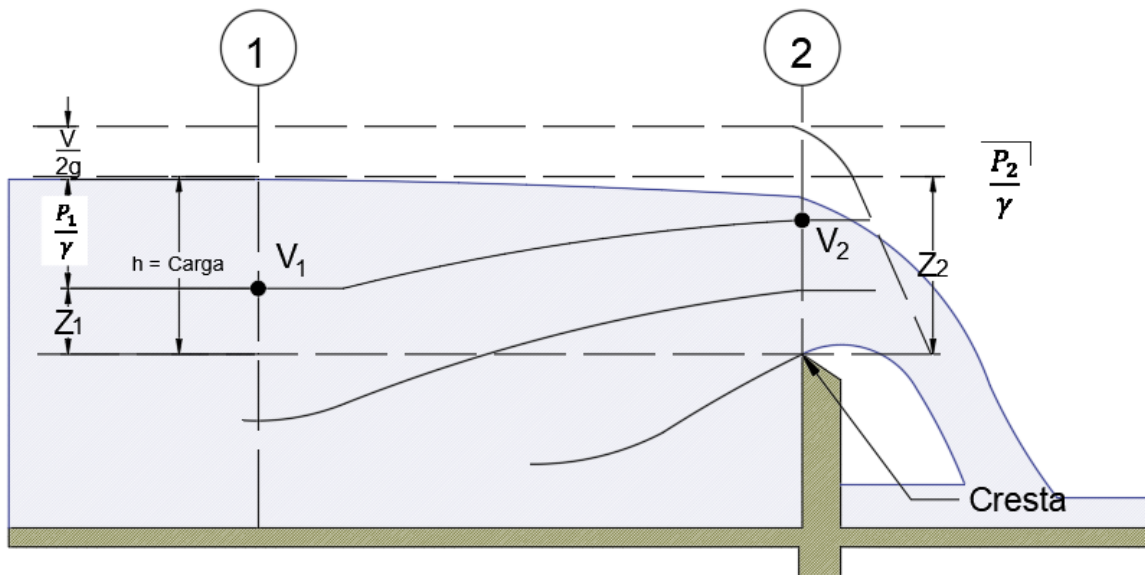


Figura 6-8: Diagrama análisis ecuación de energía en vertedero.
Fuente: Adaptación de Hidráulica Experimental, Rodríguez Díaz (2000).

6.1.7 Canal Hidráulico para Ensayos

El canal hidráulico para ensayos que se pretende modelar es el correspondiente a la referencia FC300 de la marca TecEquipment Ltd., con dimensiones en el canal de 7.5 m de longitud, una altura de 0.40 m y 0.30 m de ancho.

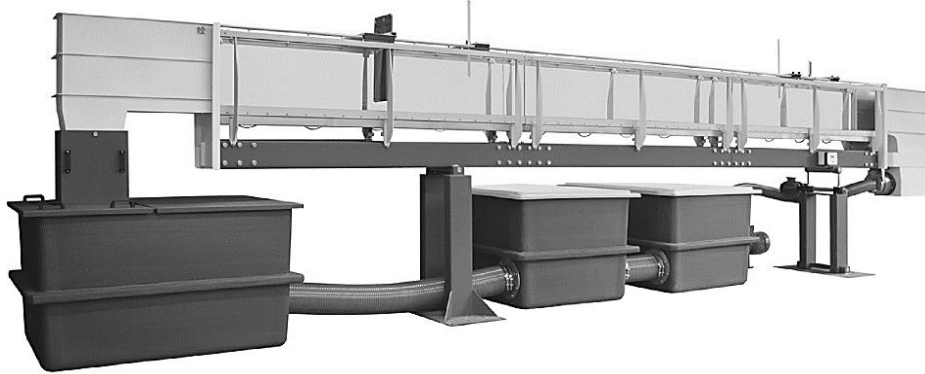
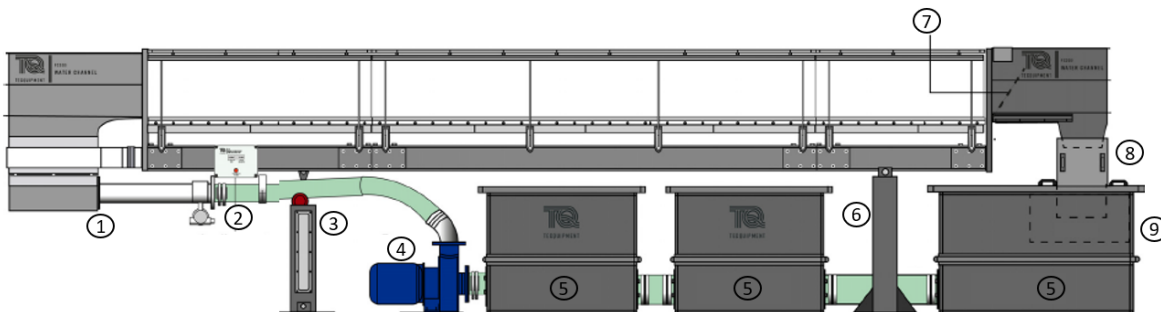


Ilustración 6-1: Canal hidráulico para ensayos FC300.
Fuente: *FC300 Use Guide* [18].

Cuenta con un panel que permite controlar caudales hasta un máximo de 38 L/s que son suministrados por una bomba centrífuga de 4kW de potencia. Dentro del panel también es posible contralar la pendiente longitudinal del canal por medio de un gato hidráulico ubicado en el primer paral y una articulación en el segundo. Las pendientes pueden variar entre -0.5% y +2.5%. En el lecho del canal es posible conectar medidores de presión con intervalos de 0.25 m a la longitud de este.

La Figura 6-9 enumera los diferentes componentes que hacen parte del canal hidráulico para ensayo del modelo FC300. Además, es compatible con diferentes accesorios que permite el desarrollo de diferentes ensayos, para el caso de estudio, los vertederos rectangulares y triangulares [18].



- | | |
|---|----------------------------|
| 1. Tubería de Entrada. | 6. Paral con Articulación. |
| 2. Tablero Control de Caudal y Pendiente. | 7. Compuerta Abatible. |
| 3. Paral con Gato Hidráulico. | 8. Canal de Salida. |
| 4. Bomba Hidráulica. | 9. Filtro de Sedimentos. |
| 5. Tanques de Almacenamiento. | |

Figura 6-9: Elementos que componen el canal para ensayos hidráulicos.
Fuente: *FC300 Use Guide* [18].

6.2. MARCO CONCEPTUAL

La realización de modelaciones relacionadas con la dinámica de fluidos computacional, enfocada al ensayo de vertederos, requiere ciertos procesos y conceptos asociados, con los que, en algunos casos, el lector puede no estar familiarizado. Con ese fin se pretende definir algunos de estos.

Dinámica de Fluidos es la rama de la física que reúne los conocimientos en cuanto a la descripción matemática de diferentes fenómenos que presentan los líquidos o gases que se encuentran en movimiento e interactúan con otros fluidos o sólidos. La descripción de dichos fenómenos se realiza mediante ecuaciones o sistemas de ecuaciones [13].

Dinámica de fluidos computacional es la interacción de la dinámica de fluidos con el desarrollo de software que permite la solución e interpretación de los sistemas de ecuaciones que describen un fenómeno. Dichos softwares trabajan bajo métodos numéricos iterativos mediante los cuales pretenden obtener las soluciones o grupos de soluciones más óptimas referentes a la modelación [2].

Lenguaje de programación es un conjunto de reglas de sintaxis con los que es posible realizar comandos de ejecución y algoritmos, que permiten dar órdenes para ejecutar procesos físicos o procesos lógicos de manera repetitivas hasta cumplir los objetivos del mismo.

Canal hidráulico de laboratorios es un equipo que nos permite realizar modelaciones, a escala, de fenómenos que se presentan en canales naturales reales y que permite identificar diferentes variables, a fin de comprender de mejor manera los comportamientos de los fluidos en este tipo de estructuras [3].

Ensayo de vertedero nos permite conocer los caudales en un canal a partir del análisis de su comportamiento en función de la ecuación de la energía de Bernoulli. Analizar aguas arriba y aguas abajo del vertedero las alturas de lámina de agua, la geometría del caudal y aplicar la ecuación del vertedero nos permitirá identificar el caudal que pasa [3].

6.3. ESTADO DEL ARTE

La aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional ha sido pilar en diferentes investigaciones en el área del manejo de los recursos hídricos. Es importante destacar los aportes que tienen relación con el desarrollo del presente proyecto en las siguientes investigaciones:

La aplicación de modelos CFD requieren la simplificación de algunos parámetros en ecuaciones como las de Navier-Stokes, la discretización espacial del elemento a

modelar y la utilización de métodos numéricos para la obtención de una solución a las variables analizadas. Lo anterior, debido a la complejidad que presentan las masas de fluido en estados dinámicos. Como lo indica MEng, Juan Camilo Arango Escobar, en su investigación *“Analysis of hydrodynamic forces on high-head slide gates using Computational Fluid Dynamics”* de 2018, tras la calibración del proceso mediante matemática estadística, los cambios en la configuración de factores de escala del modelo CFD no afectan de manera sensible los resultados obtenidos [19].

En la investigación de MEng, Alexander Villamizar Hernández, *“Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal”*, se encuentra gran aporte al análisis de los softwares CFD para modelación en canales. Por ejemplo, a partir del análisis realizado en la investigación, se recomienda la utilización del software SALOME-MECA, para la creación de la malla geométrica. Lo anterior, debido a su simplicidad e interacción eficiente con herramientas de cálculo como OpenFOAM, muy por encima de otros paquetes computacionales analizados. Por otra parte, establece que el módulo para visualización de resultados, ParaView, otorga notables beneficios en cuanto a la presentación de los mismos, donde se pueden medir diferentes variables como presión, volumen y láminas de agua [12].

Adicionalmente, la investigación de Villamizar, recomienda la utilización de equipos de cómputo de estructura de 64 bits con cuatro procesadores lógicos, memoria RAM de 16 GB y una velocidad de proceso de 3100 MHz para lograr tiempos de proceso entre 3 y 6 horas, para modelaciones similares a las establecidas en su investigación. Configuraciones de menores especificaciones podrían aumentar dichos tiempos de procesamiento de datos [12].

En el año 2018, en *“Process Modeling and Simulation Using Computational Fluid Dynamics”* el Magister en Ingeniería, Carlos Enrique Llano Serna, refiere que los cambios de los tamaños de los volúmenes finitos en las estructuras de malla geométrica pueden generar variaciones, que, aunque mínimas, podrían llegar a viciar ciertos resultados. Recomienda, entonces, que los procesos de construcción del modelo geométrico sean lo más finos y precisos posibles, teniendo en cuenta que dicha configuración repercutirá notablemente en los tiempos de procesamiento [16].

7. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología, que es guía en el desarrollo del presente trabajo de aplicación de ingeniería. En ella se identifican las fases y las actividades correspondientes a dichas fases, que son de estricta necesidad para el cumplimiento de los objetivos planteados.

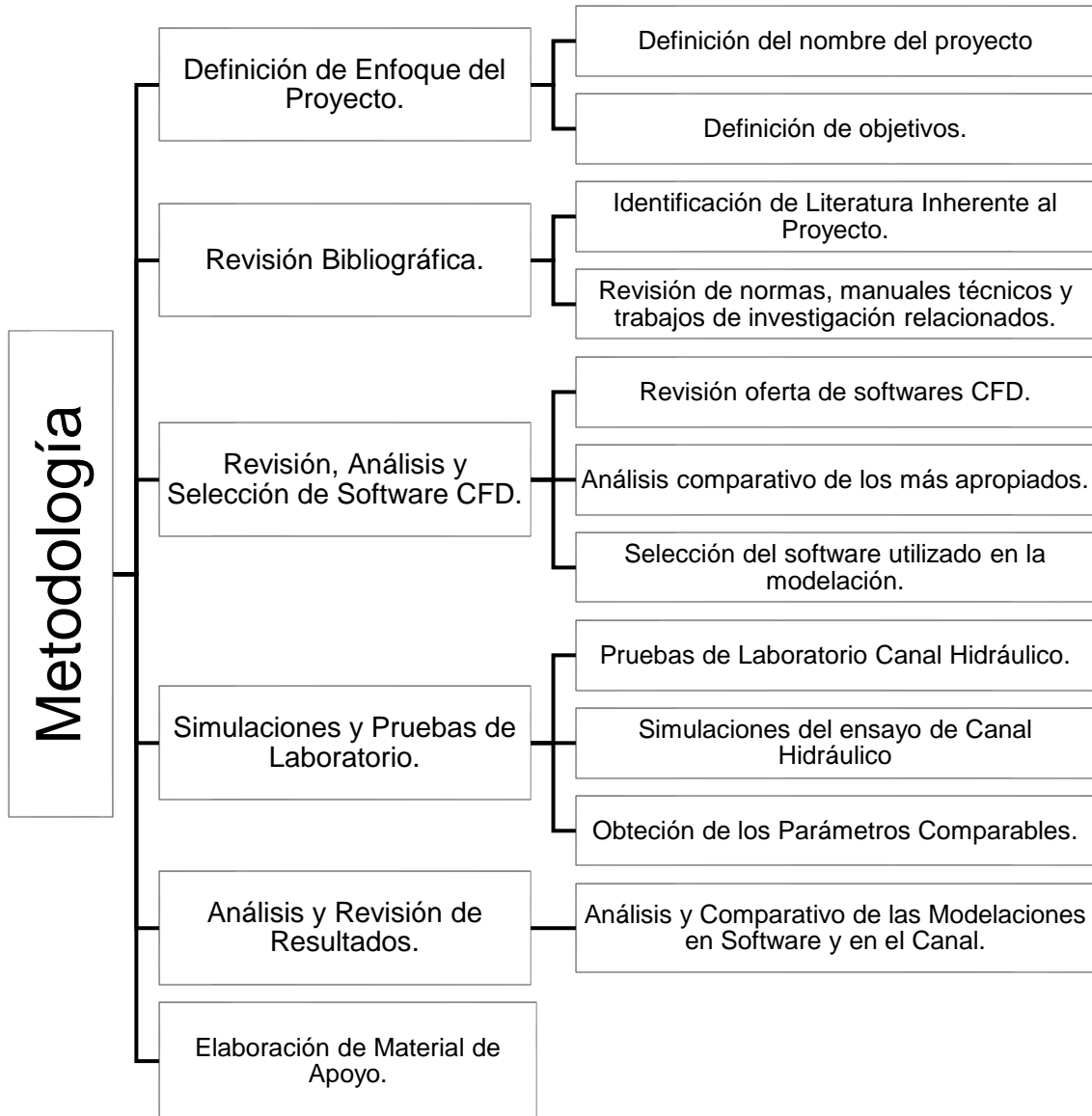


Figura 7-1: Metodología para el desarrollo.
Fuente: Autor.

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

7.1. ETAPA 1: REVISIÓN, ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SOFWARES CFD.

Se listan los principales softwares disponibles en el mercado y sus características, realizando de estas un análisis de conveniencia de acuerdo a las condiciones de la modelación inherente a este proyecto y los recursos de los que se dispone.

7.2. ETAPA 2: SIMULACIONES, PRUEBAS DE LABORATORIO Y SIMULACIONES:

Durante esta etapa se realizarán las actividades que permitan el desarrollo del proyecto mediante las simulaciones, pruebas en el canal y la obtención de los parámetros arrojados de estos ensayos. Se incluyen actividades como:

- Pruebas de Laboratorio y Simulaciones.
 - Pruebas de Laboratorio Canal Hidráulico.
 - Simulaciones del ensayo de Canal Hidráulico
- Obtención de Parámetros Analizables.
 - Variables de Laboratorio Canal.
 - Variables Modelación CFD.

8. ETAPA 1: REVISIÓN, ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SOFTWARES CFD.




Antes de empezar el proceso para realizar la modelación, es de primera importancia definir sobre cual herramienta de CFD se realizará. Como se mencionó al definir la Dinámica de Fluidos Computacional [6.1.1], esta, tiene una amplia demanda en diferentes sectores como la academia y la industria, entre otros. Como es de esperarse, diferentes compañías dedicadas al software para ingeniería han desarrollado sus soluciones orientadas a CFD. La oferta es numerosa.

Como primera medida para la selección, se realizó una búsqueda en portales, blogs y foros especializados en CFD como *CFD-Online*², Autodesk foro para CFD³, *CFD Direct*⁴ y el *subreddit r/CFD*⁵. De esta consulta se pudo obtener una lista de no menos de diez programas y *toolbox* disponibles para la correcta ejecución del presente proyecto.

Posteriormente, se recurrió al portal de *Technology Evaluation Centers (TEC)*⁶, una compañía que se encarga de realizar evaluaciones a diferentes softwares de diversas ramas con el fin de dar luces sobre cuáles son los mejores de la amplia lista obtenida. Para el caso de CFD, el portal, que basa sus calificaciones en los puntajes que dan diferentes usuarios según sus experiencias con las herramientas, establece un listado donde las primeras posiciones son:

1. ANSYS por *ANSYS, Inc.*
2. OpenFOAM por *The OpenFOAM Foundation.*
3. Autodesk CFD por *Autodesk, Inc.*
4. FLOW-3D por *Flow Science, Inc.*
5. PowerFLOW por *Exa Corporation.*
6. SimFlow por *SimScale GmbH.*

Para facilitar la selección se partió de este listado y se preseleccionaron los primeros tres del escalafón ANSYS, OpenFOAM y Autodesk CFD. A partir de esto, se realizó una consulta más a fondo de sus características que se pueden resumir en la Tabla 8-1.

Ítem	ANSYS 	OpenFOAM 	Autodesk CFD 
Tipo de Licencia	Pago por suscripción	Código abierto	Pago por suscripción
Plataforma	Windows / Mac OS	Linux / Windows con Ubuntu	Windows

² <https://www.cfd-online.com/Forums/>

³ <https://forums.autodesk.com/t5/cfd-forum/>

⁴ <https://cfd.direct/forum>

⁵ <https://www.reddit.com/r/CFD/>

⁶ www3.technologyevaluation.com




Ítem	ANSYS 	OpenFOAM 	Autodesk CFD 
Interfaz visual	Sí	No	Sí
Lenguaje de programación	No aplica por no ser de código abierto	C++	No aplica por no ser de código abierto
Integra el preproceso (Figura 6.3)	Sí	Contiene librerías que permiten realizar mallas simples	Se debe degenerar las geometrías en otros softwares del desarrollador
Integra el postproceso (Figura 6.3)	Sí	No	Sí
Procesamiento en paralelo usando los núcleos del procesador	Sí	Sí	No aplica
Permite la optimización de los algoritmos	No	Sí	No
Permite editar herramientas	Sí	Sí	No
Integración con otros softwares	No	Tiene herramientas para conversión de mallados de diferentes tipos	Solo con los softwares del fabricante
Apoyo para el aprendizaje	Soporte técnico	Foros y comunidades de desarrollo especializadas en cada solucionador	Soporte técnico y foros

Tabla 8-1: Relación comparativas para los softwares ANSYS, OpenFOAM y Autodesk CFD.
Fuente: Autor.

Los softwares ANSYS y Autodesk CFD, cuentan con interfaces gráficas que permiten una interacción mucho más amable para el desarrollo de una modelación. Además, cuentan con el respaldo de soporte técnico dedicado para quienes poseen una licencia de estos productos. La interfaz gráfica de estos programas contribuye a la integración de todos los procesos de la Dinámica de Fluidos Computacional como el preproceso, solver y postproceso.

Estas herramientas son mayormente utilizadas en la industria ya que ofrecen una gran facilidad para desarrollar modelaciones de manera eficiente, por ejemplo, en procesos de diseño y rediseño. También hace que la necesidad de conocimientos sobre las ecuaciones relacionadas con el Método de Volúmenes Finitos y la dinámica de fluidos sea menor en comparación con otras soluciones. Esto permite la reducción de recursos humanos especializados en áreas demasiado específicas.

Por otra parte, el programa de mayor desarrollo en la academia es OpenFOAM. OpenFOAM, gracias a contar con licencia de código libre ha permitido desplegar una variedad de solucionadores con los que se puede realizar simulaciones de una mayor complejidad y con modelos más robustos. Poder tener acceso y capacidad de modificación de los algoritmos y ecuaciones a solucionar requieren de por sí un conocimiento preciso de los mismos.

Durante el progreso del presente proyecto no se pretende realizar variaciones en las ecuaciones o algoritmos como lo permiten los softwares de código abierto. Sin embargo, se requiere entender y conocer las variables que puedan afectar el rendimiento y calidad de la modelación, contar con el apoyo de las comunidades académicas y de desarrollo, y no menos importante la reducción de inversión de recursos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establece que el desarrollo de las modelaciones necesarias para este proyecto se realiza con la herramienta OpenFOAM. Como se resumió, las desventajas que pueden generar mayor impacto son la inexistencia de una interfaz gráfica, la no integración de los procesos de la Dinámica de Fluidos Computacional y que la herramienta está diseñada para el sistema operativo Linux.

En sí, la herramienta OpenFOAM nos permite calcular la simulación a partir de los parámetros definidos por el usuario, más no, dibujar la geometría, crear la malla o representar gráficamente los resultados. Para poder llevar a cabo estas tareas es necesario recurrir a otras herramientas especializadas en estos procesos, y así, poder completar el entorno de trabajo CFD, como se muestra en Figura 8-1.

Para la creación de la geometría y la solución de esta como una malla por el Método de Volúmenes Finitos el software Salome de *Salome Platform*. Esta herramienta nos permite definir qué tan finos será los volúmenes de control para el montaje. Para cubrir el postproceso se establece trabajar con ParaView que interpreta los resultados del solver junto con el mallado para establecer una representación gráfica en función del tiempo de las variables computadas.



Figura 8-1: Herramientas complementarias para OpenFOAM.
Fuente: Autor.

9. ETAPA 2: PRUEBAS DE LABORATORIO, SIMULACIONES Y OBTENCIÓN DE DATOS.

9.1. PRUEBAS DE LABORATORIO

Como primera instancia se realizaron las pruebas de laboratorio correspondientes a los ensayos de vertedero rectangular y vertedero triangular en el canal para ensayos hidráulicos. Estos ensayos se realizaron apoyados en [3] y [19].

Los montajes se realizaron con los accesorios para ensayo de vertederos que incluye el canal hidráulico FC300, como el *holder* y los vertederos necesarios para el caso (Figura 9-1a). Adicionalmente, se utilizó el tablero de presiones de 32 vías (Figura 9-1b).

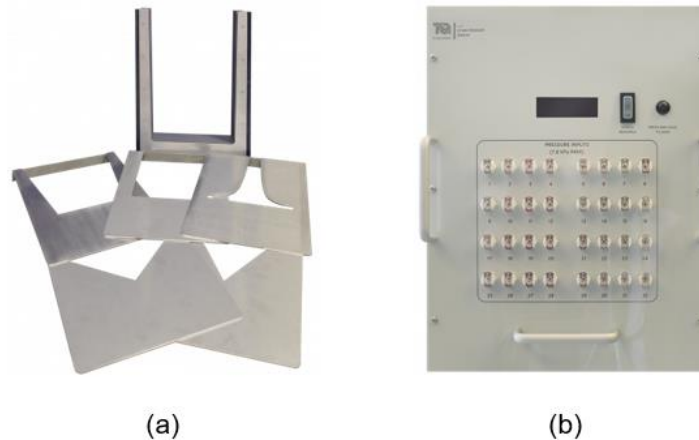
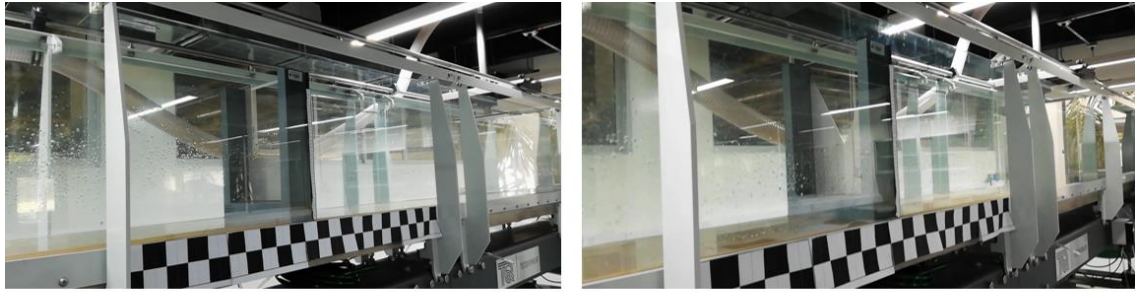


Figura 9-1: Accesorios del FC300 para ensayo de vertederos: a. *Holder* y vertederos, b. Tablero de presiones.

Fuente: [19].

El *holder* se ubicó a la mitad de distancia que recorre el canal, es decir, a 3.50 m del inicio, como se observa en la Figura 9-2. Para el tablero de presiones, se realizaron 5 conexiones distribuidas a los 1, 2.5, 4, 4.5 y 6.25 m en el lecho del canal (Figura 9-3). Aunque el canal permite configurar pendiente variable, para este ensayo se decidió trabajar con este en posición totalmente horizontal, es decir, 0.00% de pendiente.

Por razones geométricas, los vertederos tienen capacidades de vertimiento diferentes, siendo estas menores para el vertedero triangular que para el rectangular. Con el fin de poder realizar mediciones de láminas de agua y de los filos, con ayuda del caudalímetro, se establecieron gradualmente caudales de 15 L/s y 5 L/s para el vertedero rectangular y triangular respectivamente (Figura 9-4 y Figura 9-5). Estos valores resultan del momento en el que se estabiliza el flujo, después de verter, donde se pueda establecer unas alturas de lámina de agua considerables para la medición.



(a)

(b)

Figura 9-2: Montaje para ensayos de vertedero: a. Rectangular, b. Triangular
Fuente: Autor.



Figura 9-3: Montaje del tablero de presiones.
Fuente: Autor.



(a)

(b)

Figura 9-4: Definición de caudales para vertederos: a. Rectangular, b. Triangular.
Fuente: Autor.



(a)

(b)

Figura 9-5: Lecturas del flujómetro: a. Rectangular, b. Triangular.
Fuente: Autor.

De estos ensayos se obtuvieron datos de altura de lámina de agua a 0.5 m aguas arriba del vertedero, sobre el vertedero y 0.5 m aguas abajo del vertedero para los dos montajes. Adicionalmente, con la ayuda del tablero de presiones, se estableció la variación temporal de presiones en las pruebas, en los puntos señalados. Por último, se realizaron filmaciones de los ensayos con el fin de documentar el desplazamiento de la masa de agua en función del tiempo. Estos resultados son presentados, analizados y comparados a profundidad en la sección de Análisis de Resultados.

9.2. CONSTRUCCIÓN DE LAS MALLAS

Con el fin de poder realizar una modelación de la geometría de la manera más exacta se procedió con la medición de todas las dimensiones del montaje con la ayuda de cintas métricas y calibradores (pie de rey). Estos datos de medición fueron insumo para elaborar planos del canal en AutoCAD, con el fin de poder referenciarlos en ejes y así extraer un grupo de puntos coordenados que permitan representar el canal en la modelación (Figura 9-6 y Tabla 9-1).

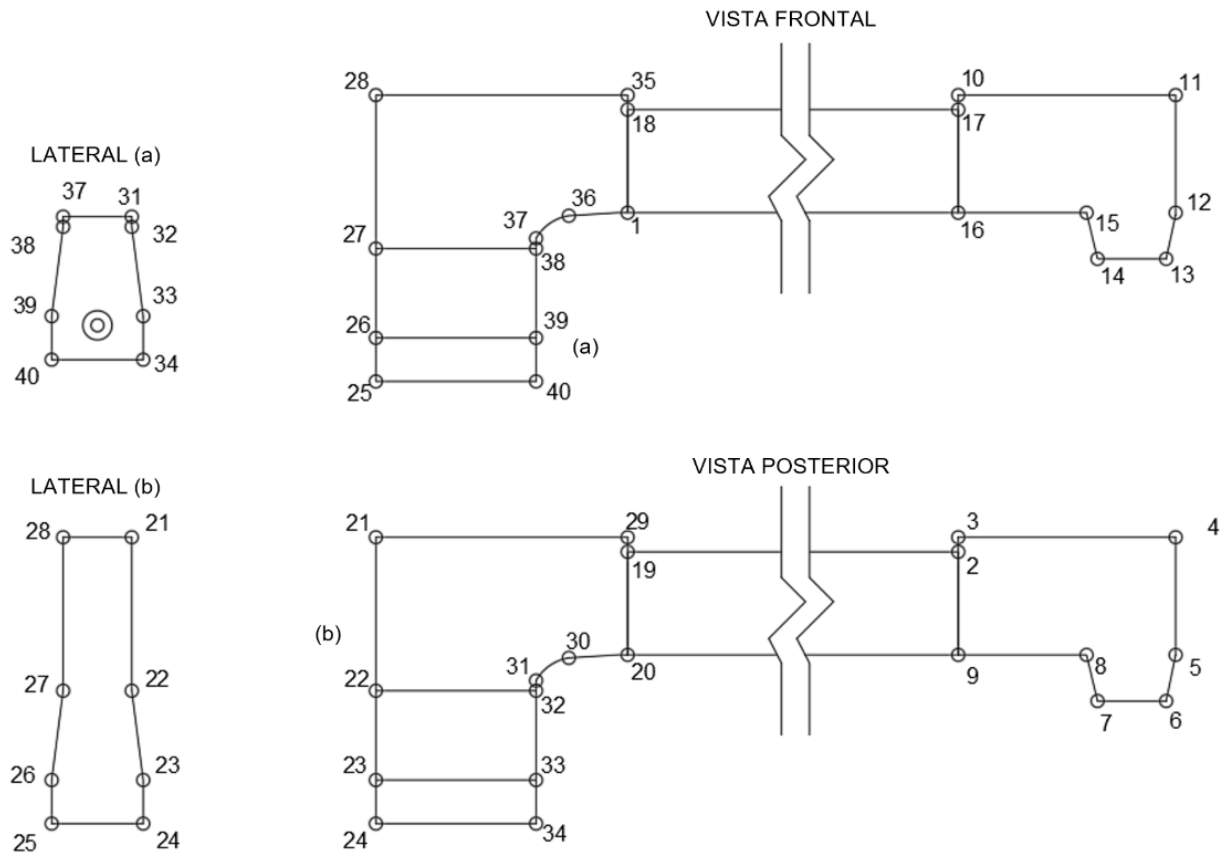


Figura 9-6: Planos referenciados del canal y puntos coordenados.

Fuente: Autor.

Punto	X	Y	Z	Punto	X	Y	Z
1	1.100	0.000	0.737	21	0.000	0.300	1.250
2	8.600	0.300	1.187	22	0.000	0.300	0.580
3	8.600	0.300	1.250	23	0.000	0.350	0.190
4	9.550	0.300	1.250	24	0.000	0.350	0.000
5	9.550	0.300	0.737	25	0.000	-0.050	0.000
6	9.509	0.300	0.535	26	0.000	-0.050	0.190
7	9.209	0.300	0.535	27	0.000	0.000	0.580
8	9.161	0.300	0.737	28	0.000	0.000	1.250
9	8.600	0.300	0.737	29	1.100	0.300	1.250
10	8.600	0.000	1.250	30	0.843	0.300	0.723
11	9.550	0.000	1.250	31	0.700	0.300	0.625
12	9.550	0.000	0.737	32	0.700	0.300	0.580
13	9.509	0.000	0.535	33	0.700	0.350	0.190
14	9.209	0.000	0.353	34	0.700	0.350	0.000
15	9.161	0.000	0.737	35	1.100	0.000	1.250
16	8.600	0.000	0.737	36	0.843	0.000	0.723
17	8.600	0.000	1.187	37	0.700	0.000	0.625
18	1.100	0.000	1.187	38	0.700	0.000	0.580
19	1.100	0.300	1.187	39	0.700	-0.050	0.190
20	1.100	0.300	0.737	40	0.700	-0.050	0.000

Tabla 9-1: Puntos coordenados del canal.

Fuente: Autor.

Como se mencionó en la Etapa 1, el preproceso, en especial la construcción de las mallas bajo el método de volúmenes finitos, se realizará con Salome 9.4.0. A partir del listado de puntos, se realizaron los lazos y las caras que generan la geometría del canal. Sobre estas geometrías se montaron los vertederos como se aprecia en la Figura 9-7.

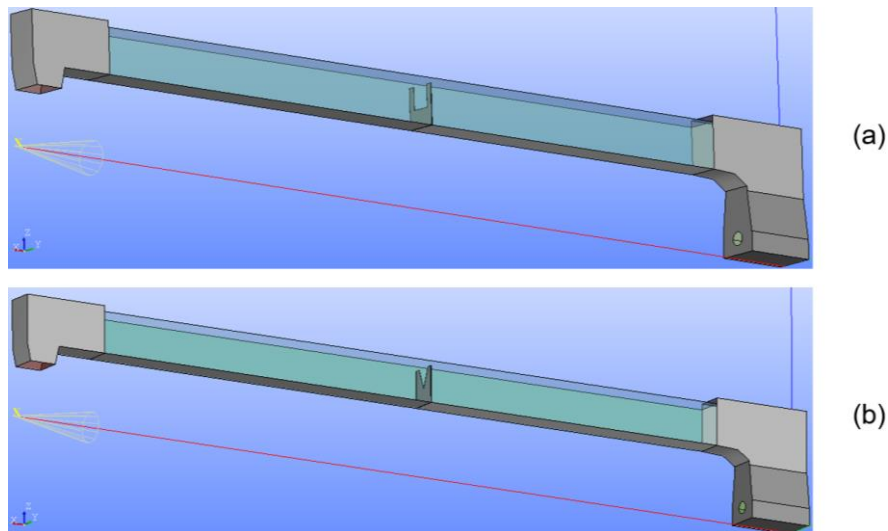


Figura 9-7: Geometría del canal, a. Rectangular, b. Triangular.

Fuente: Autor.

Una vez establecidas las geometrías se procede a la sección de mallado de Salome. Para el fin de establecer los volúmenes de control por el método de elementos finitos, se define que se elaboren tetraedros donde sus caras deben medir entre 0.05 m y 0.01 m, estableciendo estos lo más fino que sea posible (Figura 9-8). 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.

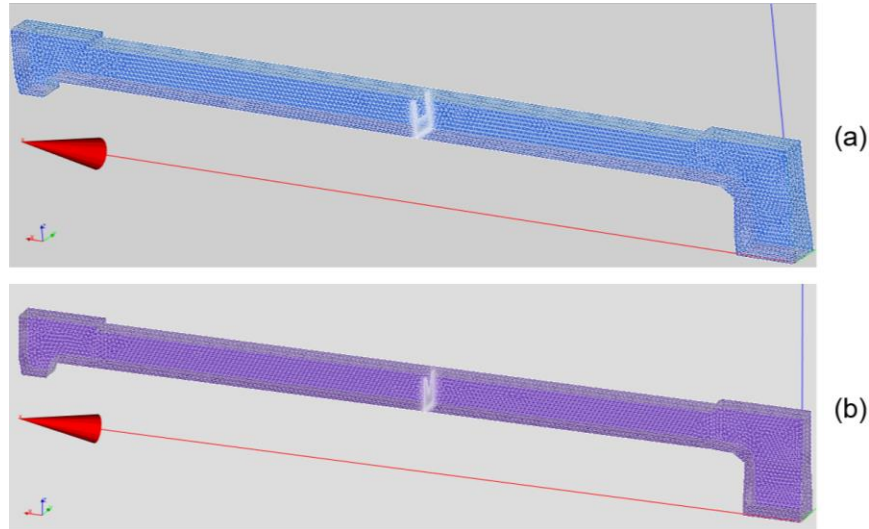


Figura 9-8: Mallado del canal, a. Rectangular, b. Triangular.
Fuente: Autor.

El tiempo de cálculo para la solución de los mallados con las condiciones mencionadas, no toma más de un minuto. La cantidad de elementos generados se relaciona en la Figura 9-9.

Nodes: <input type="text" value="15656"/>					Nodes: <input type="text" value="15506"/>				
Elements:	Total	Linear	Quadratic	Bi-Quadratic	Total	Linear	Quadratic	Bi-Quadratic	
		<input type="text" value="83711"/>	<input type="text" value="83711"/>	<input type="text" value="0"/>		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="82662"/>	<input type="text" value="82662"/>	<input type="text" value="0"/>
0D:	<input type="text" value="0"/>				<input type="text" value="0"/>				
Balls:	<input type="text" value="0"/>				<input type="text" value="0"/>				
1D (edges):	<input type="text" value="1443"/>	<input type="text" value="1443"/>	<input type="text" value="0"/>		<input type="text" value="1415"/>	<input type="text" value="1415"/>	<input type="text" value="0"/>		
2D (faces):	<input type="text" value="18584"/>	<input type="text" value="18584"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="18718"/>	<input type="text" value="18718"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
Triangles:	<input type="text" value="18584"/>	<input type="text" value="18584"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="18718"/>	<input type="text" value="18718"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
Quadrangles:	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
Polygons:	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>		
3D (volumes):	<input type="text" value="63684"/>	<input type="text" value="63684"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="62529"/>	<input type="text" value="62529"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
Tetrahedrons:	<input type="text" value="63684"/>	<input type="text" value="63684"/>	<input type="text" value="0"/>		<input type="text" value="62529"/>	<input type="text" value="62529"/>	<input type="text" value="0"/>		
Hexahedrons:	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
Pyramids:	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>		
Prisms:	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
Hexagonal Prisms:	<input type="text" value="0"/>				<input type="text" value="0"/>				
Polyhedrons:	<input type="text" value="0"/>				<input type="text" value="0"/>				

Figura 9-9: Cantidad de elementos de los mallados, a. Rectangular, b. Triangular.
Fuente: Autor.

9.3. DEFINICIÓN DEL SOLVER

Se ha definido la utilización de la librería *Open Field Operation and Manipulation – OpenFOAM*, que son un conjunto de módulos de C++, integrados a su vez por *solvers*. Estos *solver* no son más que ficheros con líneas de código en lenguaje C++ que indican la forma de resolver las ecuaciones y los procesos que intervienen en la solución de los modelos de interés.

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.

Para la modelación de los ensayos de vertederos trabajaremos con el grupo *Multiphase* que permite la solución de modelaciones donde interactúen varios fluidos de características variadas y, en específico, el *interFoam* que permite “solucionar dos fluidos compresibles, isotérmicos inmiscibles utilizando volúmenes finitos” [22]. En la Figura 9-10, se muestra los ficheros y la organización en carpetas requeridas para el *solver interFoam*.

9.4. DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA Y PARÁMETROS DE MODELACIÓN

Una vez generada la geometría y el mallado de los modelos del canal con los vertederos, se establecen las condiciones de borde para el conjunto de caras que las componen. La cara donde se encuentra la conexión con la tubería de suministro se fija como la entrada o *inlet*, la salida de descarga del canal se establece como *outlet*, las caras libres como la atmosfera o *atmosphere* y, por último, las demás caras como las paredes o *modelWall*.

De la misma forma, OpenFOAM requiere que se identifique cuáles de condiciones de borde son muros (*wall*) y cuales son parches (*patch*) a los cuales se les definirá las condiciones de frontera. Para el caso, se establecen las condiciones de borde como se muestra en la Tabla 9-2.

Borde	Condición
<i>modelWall</i>	<i>wall</i>
<i>inlet</i>	<i>patch</i>
<i>outlet</i>	<i>patch</i>
<i>atmosphere</i>	<i>patch</i>

Tabla 9-2: Condiciones de Borde.

Fuente: Autor.

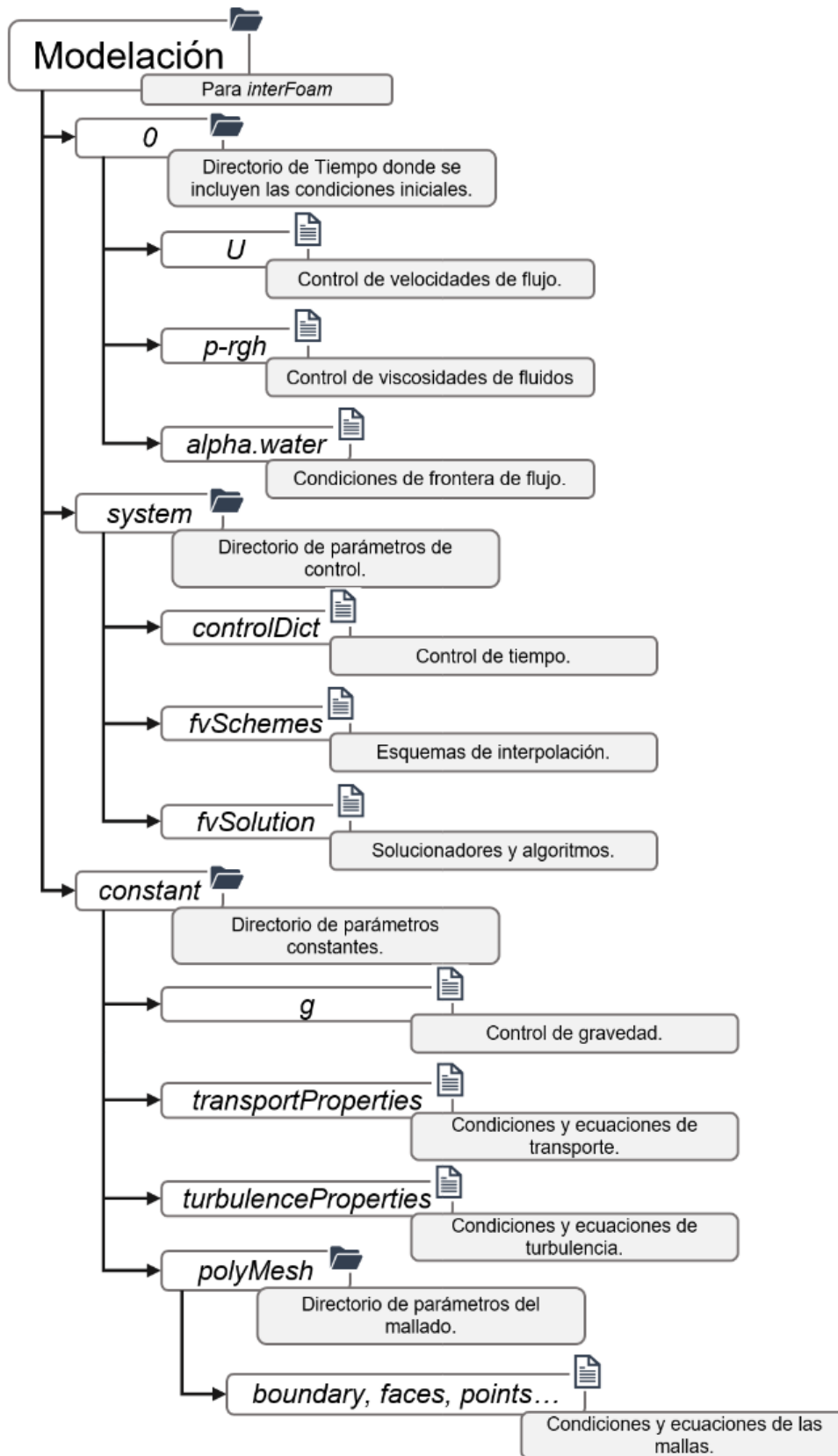


Figura 9-10: Directorios y fichero para *interFoam*.
Fuente: Autor, basado en [22].

Dado que los mallados se elaboraron en Salome, donde su formato es *.unv, se debe hacer uso de la librería de transformación de mallas y el comando *ideasUnvToFoam* para así poder convertir a ficheros de C++, como información reconocible. El uso de esta herramienta reconoce los grupos creados y los establece como grupos de volúmenes como lo muestra la Figura 9-11.

```
andresdiaz@DESKTOP-G6D1QM4:~/vertrifi$ ideasUnvToFoam vertri.unv
/*-----*/
|=====|
| \\ / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \\ / | O peration | Version: 4.0
| \\ / | A nd | Web: www.OpenFOAM.org
| \\ / | M anipulation |
|-----*/
Build : 4.0
Exec : ideasUnvToFoam vertri.unv
Date : Aug 07 2020
Time : 22:17:41
Host : "DESKTOP-G6D1QM4"
PID : 20
Case : /home/andresdiaz/vertrifi
nProcs : 1
fileModificationChecking : Monitoring run-time modified files using timeStampMaster
allowSystemOperations : Allowing user-supplied system call operations

// ***** //
Create time

Processing tag:2467
Starting reading patches at line 197777.
For group 1 named modelWall trying to read 16224 patch face indices.
For group 2 named inlet trying to read 24 patch face indices.
For group 3 named outlet trying to read 86 patch face indices.
For group 4 named atmosphere trying to read 2384 patch face indices.

Sorting boundary faces according to group (patch)
0: modelWall is patch
1: inlet is patch
2: outlet is patch
3: atmosphere is patch

Constructing mesh with non-default patches of size:
modelWall 16224
inlet 24
outlet 86
atmosphere 2384

End
```

Cantidad y tamaño de bordes transformados.

Figura 9-11: Transformación del mallado.
Fuente: Autor.

Como condiciones iniciales, dentro del directorio de tiempo definido como 0, se estableció en control de velocidad U , un valor de flujo volumétrico de entrada de $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ para el ensayo de vertedero rectangular y vertedero triangular, respectivamente, de acuerdo a lo establecido en las pruebas de laboratorio. Correspondiente a lo anterior, dentro de *alpha.water* se estableció como la única entrada de agua el borde *inlet*.

Cómo se trabaja con el solucionador *interFoam*, es necesario establecer las propiedades de los dos fluidos que interactuarán en la modelación, es decir, el agua y el aire. Para estos se fijan los valores de viscosidad cinemática y la densidad para los dos fluidos a una temperatura promedio aproximada de 18°C (control en

laboratorio), como en la Tabla 9-3. Estos valores se deben establecer en el fichero *transportProperties* y son los mismos para los dos ensayos.

Fluido a 18°C	Viscosidad Cinemática ν (m ² /s)	Densidad ρ (g/m ³)
Agua	1.49 e-06	998.68
Aire	1.48 e-05	1.21

Tabla 9-3: Valores de Viscosidad Cinemática y Densidad.

Fuente: Autor, basado en [13].

Por último, otras propiedades generales para ambas modelaciones, vertedero rectangular y vertedero triangular, se establecen como:

- Valor de la gravedad -9.81 m/s^2 en el sentido del eje coordenado y .
- La modelación inicia en el tiempo 0, donde se establecieron las condiciones iniciales, y termina en el tiempo 120. Cada unidad de tiempo en OpenFOAM corresponde a un segundo.
- Se escriben ficheros de resultados cada variación temporal de la modelación de 0.05 segundos. Obteniendo en total 2400 ficheros para una tasa de 20 f/s.
- No se establecen condiciones ni variables para el análisis de vorticidades por el tamaño del modelo y las restricciones de recursos.
- El *solver interFoam* establece el algoritmo PIMPLE para solución de las ecuaciones de conservación y transporte.
- Se establece que al inicio de la modelación no se encuentran masas de agua en el canal.
- El borde *outlet*, se configura para permitir la salida del fluido agua a la misma tasa en entrada al canal, como máximo.

Al establecer los mencionados parámetros en esta sección, solo queda realizar una revisión de que los ficheros y carpetas están completos y con el comando *checkMesh* que la calidad de la malla es apropiada.

9.5. SIMULACIÓN Y TIEMPOS DE SIMULACIÓN

Una vez inicializada la simulación con *interFoam*, el tiempo de cálculo depende directamente de tres factores, en esencia, el tipo de flujo a evaluar (si se incluye o no las condiciones de turbulencia), el tamaño del mallados (cantidad de volúmenes de control) y en mayor medida de la capacidad de procesamiento del equipo a utilizar. Las características del tipo de flujo y tamaño de las mallas ya se han establecido en las secciones anteriores. La Tabla 9-4, muestra las características del equipo utilizado para correr la modelación.

Ítem	Característica
Tipo	Computador Personal Portátil
Arquitectura del procesador	64 bits
Sistema operativo	Windows 10 Home v.1909
Procesador	Intel® Core™ i5-4200M
Velocidad de procesamiento	2.50 GHz
Núcleos del procesador	2 núcleos
Memoria RAM instalada	8 GB

Tabla 9-4: Características del equipo de cómputo.

Fuente: Autor.

Aunque en sí la modelación no es compleja, el tamaño del canal y, en relación directa, el tamaño de los mallados hacen que los requerimientos de capacidad de procesamiento sean altos. La Tabla 9-5, muestra los tiempos de ejecución de las modelaciones bajo las condiciones establecidas, los recursos de procesamiento y para los ensayos. Es importante anotar que los caudales para cada modelación son significativamente diferentes.

Ensayo	Tiempo Modelado (s)	<i>ExecutionTime</i>		<i>ClockTime</i>	
		(s)	(h)	(s)	(h)
Vertedero Rectangular	120	223514	62.09	274813	76.34
Vertedero Triangular	120	325418	90.39	368921	102.48

Tabla 9-5: Tiempos de cómputo de las modelaciones.

Fuente: Autor.

Igualmente, se resalta que la consola devuelve los valores de *ExecutionTime* y *ClockTime* que corresponden a los tiempos que toma la CPU en realizar el proceso y el tiempo real transcurrido para completar el cálculo. Aunque en este particular la diferencia no es mayor, en el caso de utilizar procesamiento en paralelo en diferentes núcleos, estos valores empiezan a ser sustancialmente diferentes. Por ejemplo, para un procesador de 4 núcleos calculando en paralelo, el tiempo *ClockTime* será muy cercano a la cuarta parte del *ExecutionTime*.

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo permite analizar el desempeño de las modelaciones mediante tres comparativos que se desarrollan a partir de la información obtenida en las simulaciones, los ensayos de los laboratorios y el cálculo matemático de algunas variables. El análisis se realiza con:

1. Alturas de la lámina de agua en tres puntos cuando el flujo ya es estable y alcance de los filos.
2. Variación de presiones en función del tiempo.
3. Desplazamiento de la masa de agua en función del tiempo.

Para la toma de datos de la modelación se utiliza el programa 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.

10.1. ALTURA DE LAS LÁMINAS DE AGUA Y ALCANCE DE LOS FILOS.

Para realizar el comparativo de las láminas de agua y los filos de la lámina vertiente se cuenta con tres insumos de información: los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio, los valores obtenidos de las modelaciones y la solución matemática para estas variables. Con el fin de realizar una toma de valores de la manera más uniforme y clara posible, se establecieron las mediciones como:

- 0.50 m aguas arriba a partir de la cara del vertedero.
- Sobre el vertedero.
- 0.50 m aguas abajo a partir de la cara del vertedero.
- Desde la cara del vertedero hasta el primer filo de la lámina vertiente.
- Desde la cara del vertedero hasta el último filo de la lámina vertiente.

En el caso de los ensayos de laboratorio, las mediciones se realizaron después de los dos minutos de haber encendido la bomba, ya siendo el flujo más estable en todo el canal. Por otra parte, para las simulaciones, se tomaron los tiempos 96 s y 112 s para el vertedero rectangular y triangular, respectivamente. Lo anterior corresponde a los tiempos en los que se vuelve más continuo el flujo, luego de verter.

Las Figuras 10-1 y 10-2, muestran los resultados tomados de los ensayos de laboratorio y las modelaciones realizadas.

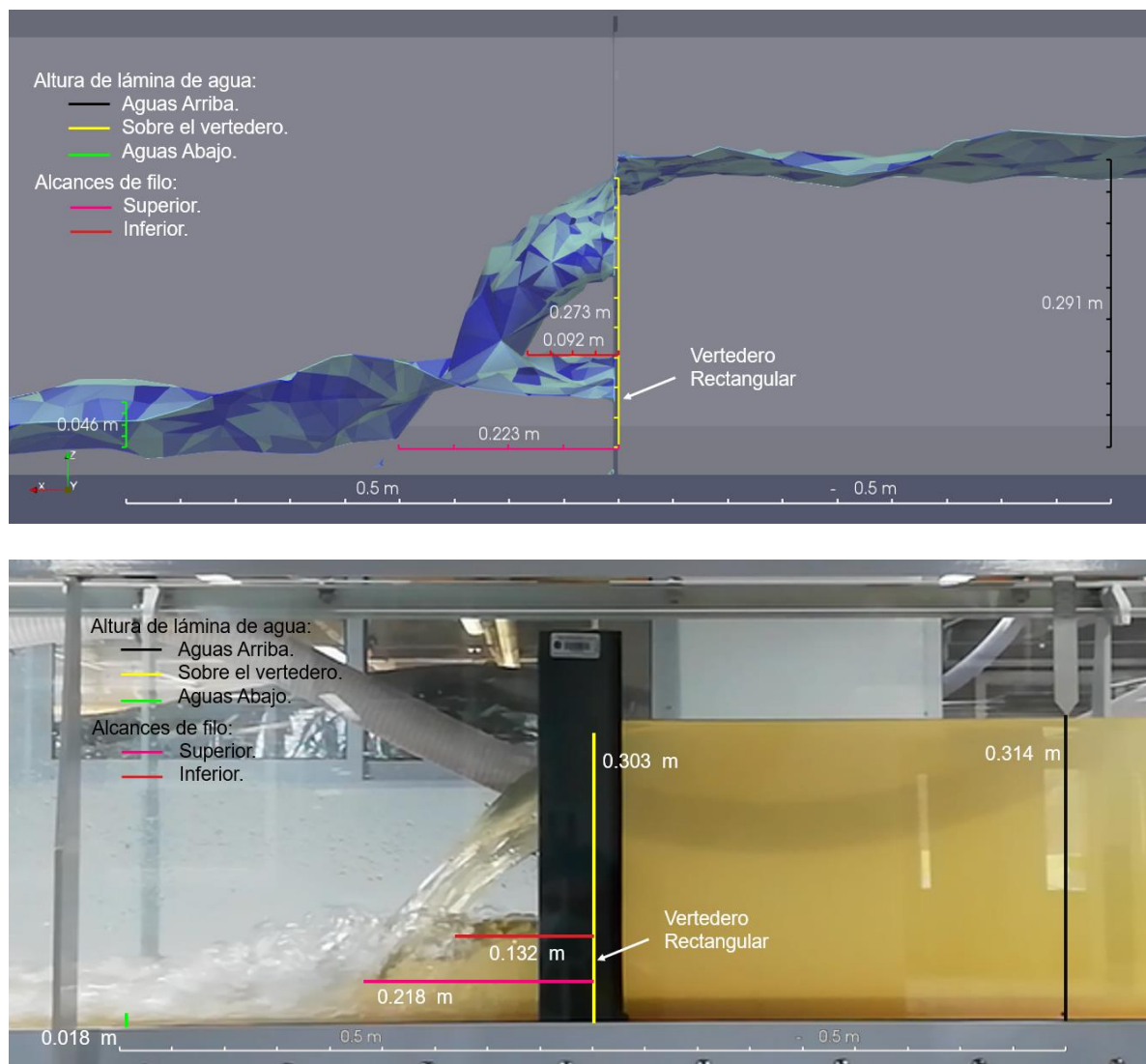


Figura 10-1: Mediciones realizadas en el ensayo y modelación de vertedero rectangular.
Fuente: Autor.

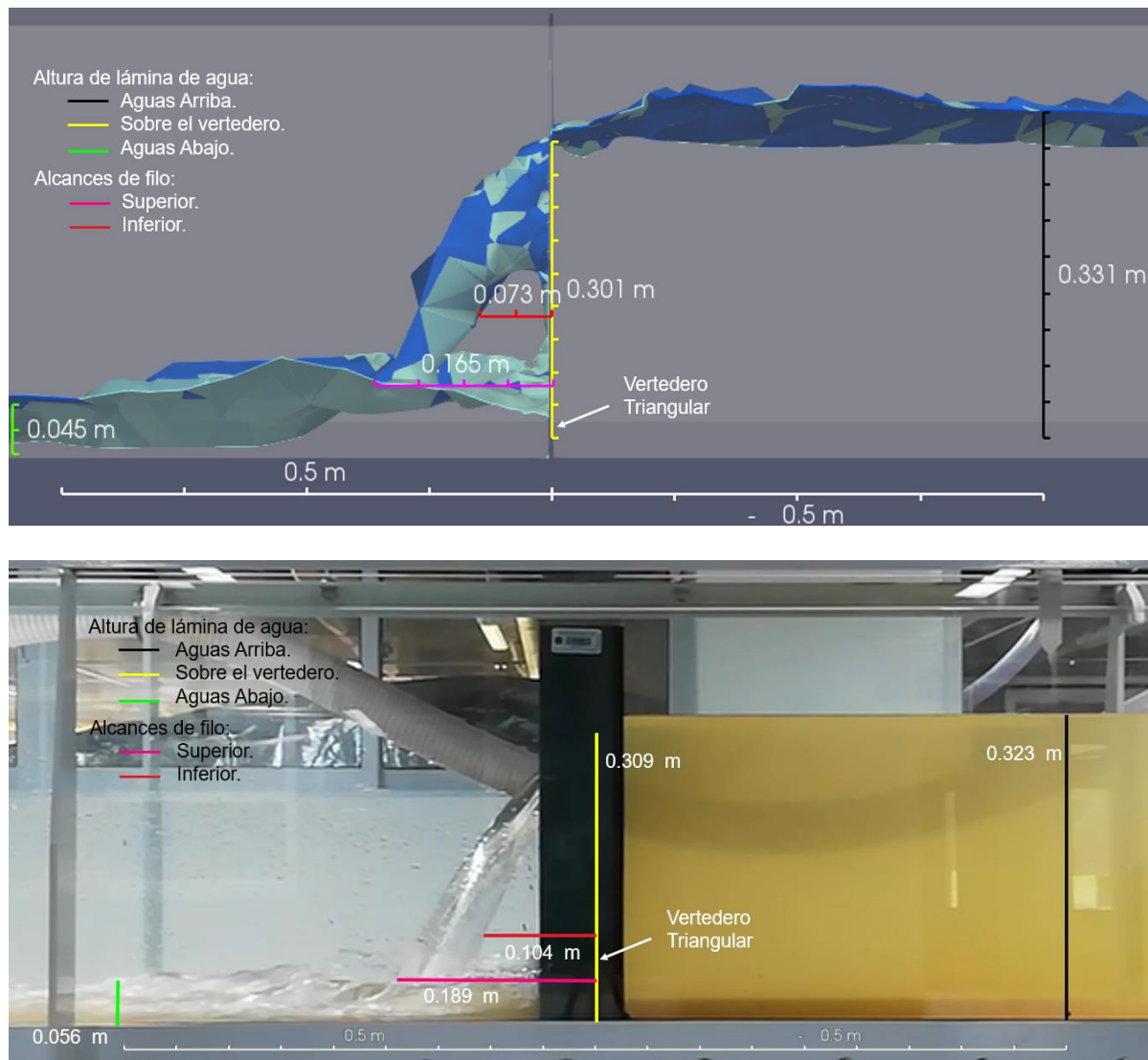


Figura 10-2: Mediciones realizadas en el ensayo y modelación de vertedero triangular.
Fuente: Autor.

Parámetro	Ítem	Medición (m)		Variación (cm)	Resultado Ecuación (m)
		Laboratorio	Modelación		
Altura lámina de agua	0.50 m aguas arriba	0.314	0.291	2.30	0.336
	Sobre vertedero	0.303	0.273	3.00	
Filo de la lámina vertiente	0.50 m aguas abajo	0.018	0.046	2.80	0.032
	Superior	0.218	0.223	0.50	0.316
	Inferior	0.132	0.092	4.00	0.184

Tabla 10-1: Relación de valores del ensayo y modelación para el vertedero rectangular.
Fuente: Autor.

Parámetro	Ítem	Medición (m)		Variación (cm)	Resultado Ecuación (m)
		Laboratorio	Modelación		
Altura lámina de agua	0.50 m aguas arriba	0.323	0.331	0.80	0.341
	Sobre vertedero	0.309	0.301	0.80	
Filo de la lámina vertiente	0.50 m aguas abajo	0.056	0.045	1.10	0.039
	Superior	0.189	0.165	2.40	0.216
	Inferior	0.104	0.073	3.10	0.175

Tabla 10-2: Relación de valores del ensayo y modelación para el vertedero triangular.
Fuente: Autor.

En comparación entre las mediciones obtenidas de los ensayos de laboratorio y los de la modelación podemos resaltar que las diferencias no superan los 5 cm, como lo muestran las Tablas 10-1 y 10-2. Estas variaciones pueden estar relacionadas directamente con la calidad del mallado, pues cabe recordar que, los valores de las alturas de las caras de los volúmenes de control varían entre 1 y 5 cm.

Con relación a los valores calculados con las ecuaciones para los vertederos las diferencias son mayores respecto a los valores de los ensayos y las modelaciones. Para la solución de las ecuaciones se estableció un coeficiente de descarga de 0.242, de acuerdo a [3]. Las variaciones en el coeficiente de descarga generan diferencias en la altura de lámina de agua, aguas arriba del vertedero, que está implícito en el cálculo de los filos de lámina de vertimiento.

10.2. VARIACIONES DE PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Como se estableció en la Sección 9.1, en el montaje del laboratorio, se instalaron piezómetros a los 1, 2.5, 4, 4.5 y 6.25 m en el lecho del canal que se conectaron al tablero de presiones del equipo del canal (Figura 10-3). Para las mediciones se ajustó la tara de los piezómetros con el canal vacío. Así mismo, se realizaron mediciones en ParaView para la modelación en los mismos puntos.

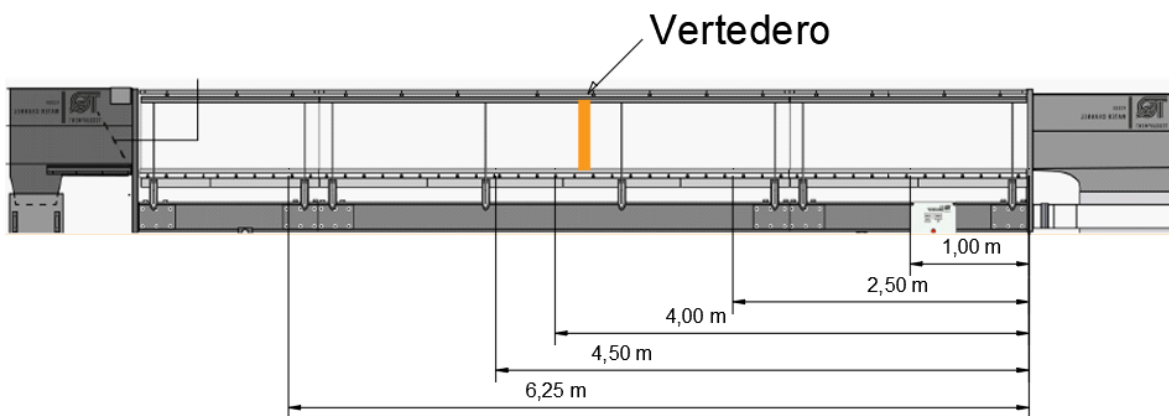


Figura 10-3: Distribución de los piezómetros.
Fuente: Autor.

La consola del canal permite la conexión con un computador para la extracción de información, para el caso se extrajeron las gráficas de presión contra el tiempo. La Figura 10-4, muestra los valores de presión en mmH₂O y el tiempo en s; los piezómetros están numerados del 1 al 5 de aguas arriba a aguas abajo.

De igual manera, se graficaron los valores entregados por ParaView, respetando los mismos parámetros, unidades y convenciones. Estos se muestran en la Figura 10-5.

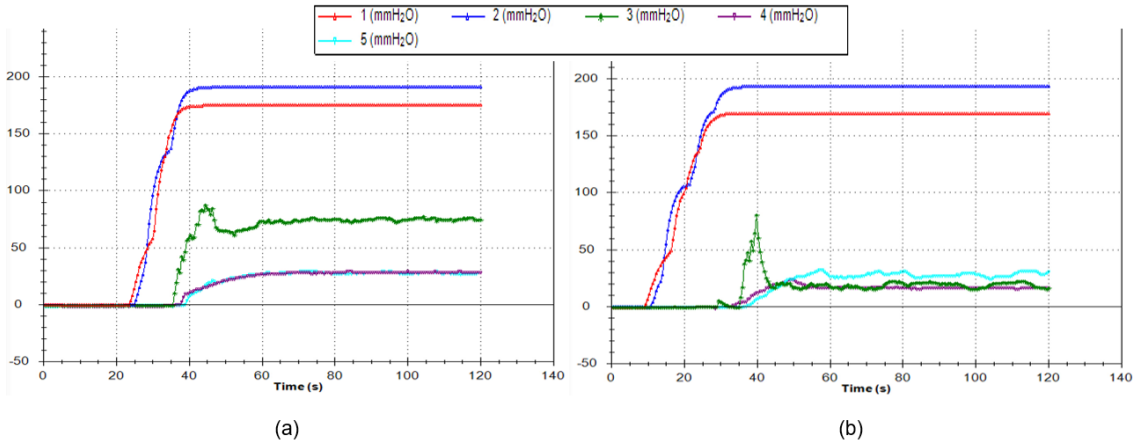


Figura 10-4: Graficas presión contra tiempo de los ensayos de laboratorio.
a. Vertedero Rectangular. b. Vertedero Triangular.
Fuente: Extraído de VDAS de TecQuiment.

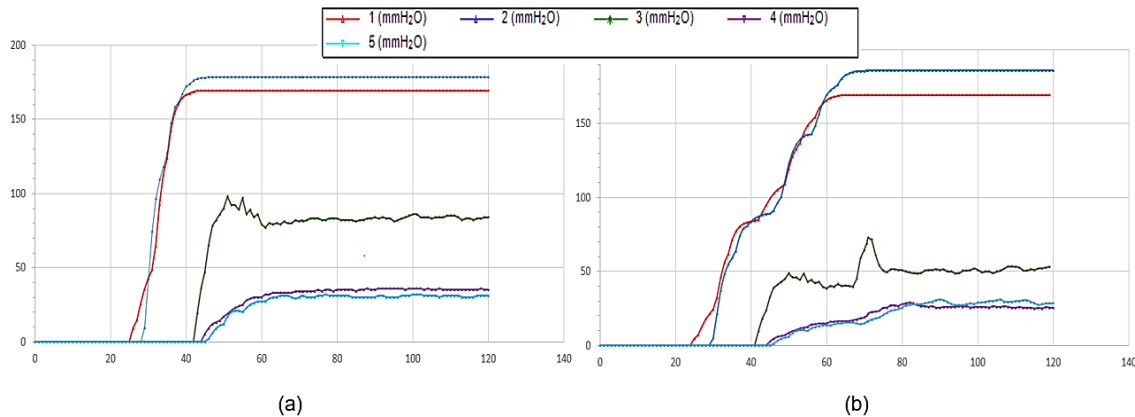


Figura 10-5: Graficas presión contra tiempo de las modelaciones.
a. Vertedero Rectangular. b. Vertedero Triangular.
Fuente: Autor. Basado en información extraída de ParaView.

Aunque, en general, el comportamiento de las gráficas son similares, se presentan importantes variaciones al detallar los valores. Por ejemplo, los inicios y picos de presión en los diferentes puntos, comparados entre los ensayos de laboratorio y las modelaciones, tienen lugar en fracciones diferentes. Por otra parte, existe una variación, aunque mínima, en los valores picos de presión.

Como se puede observar, para la medición del piezómetro número 3, existe una fracción de tiempo en la cual las mediciones de presión tienen grandes variaciones. Este comportamiento corresponde a que este piezómetro está ubicado a solo 0.25 m del vertedero y, como se puede entender, el comportamiento del fluido al verter no es constante y tiene un impacto casi directo sobre este punto generando fluctuaciones en la presión.

Al realizar el análisis del comportamiento del caudalímetro en función del tiempo (Figura 10-6), se pudo establecer que, aunque se fijaron valores para el caudal en

la consola, por las características del equipo, el caudal no es constante. Esto afecta directamente en el comportamiento el flujo en el canal del laboratorio con respecto a la modelación, en cuanto variación de presión, ya que en este si se establece un caudal fijo.

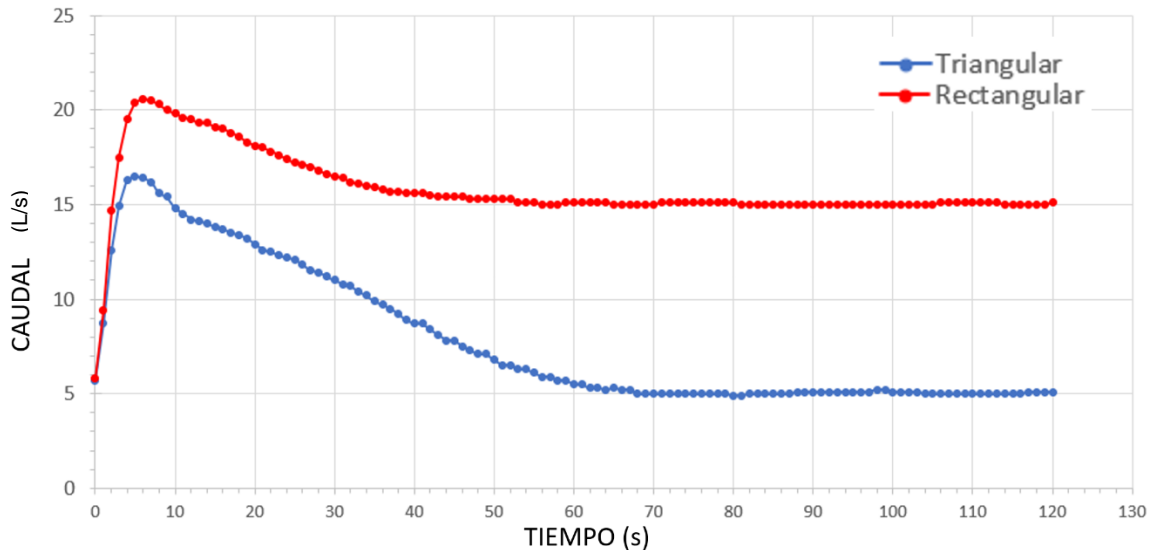


Figura 10-6: Graficas caudal contra tiempo de las modelaciones.
Fuente: Extraído de VDAS de TecQuipment.

Esta variación del caudal afecta también directamente al desplazamiento de la masa de agua, que se analiza en la siguiente sección.

10.3. DESPLAZAMIENTO DE LA MASA DE AGUA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Como última parte del análisis, se realiza un comparativo del comportamiento temporal de la masa de agua entre las modelaciones y los ensayos de laboratorio. Para realizar este análisis se realizaron montajes de video en los cuales se pueden establecer los diferentes puntos y tiempo para comparar.

Con el fin de realizar el comparativo se establecieron diferentes ítems de los cuales se anotaron los tiempos en los que se cumplen estos, tanto en la modelación como en el ensayo. Estos ítems se resumen en la Tabla 10-3, donde se incluyen los valores para los comportamientos en los vertederos rectangular y triangular.

Es importante anotar que, como se mencionó en la Sección 10.2, el caudal en los ensayos no se puede controlar como un valor único lo que, en principio, propicia cambios importantes en el flujo. Por ejemplo, como se aprecia en las Tablas 10-3 y 10-4 y las Figuras 10-7 y 10-8, los valores temporales para el ítem de inicio del vertimiento está ampliamente desfasado comparando las pruebas físicas con las virtuales.

Ítem	T. en Vertedero Rectangular (s)		Variación con Respecto al Anterior (s)	
	Laboratorio	Modelación	Laboratorio	Modelación
Primer flujo en el canal	11	13.5	-	-
Flujo toca el vertedero	14	16.3	3	2.75
Comienza a verter	24	32.0	10	15.75
Flujo estable	50	56.0	26	24

Tabla 10-3: Desplazamiento temporal de la masa de agua para el ensayo y laboratorio de vertedero rectangular.

Fuente: Autor.

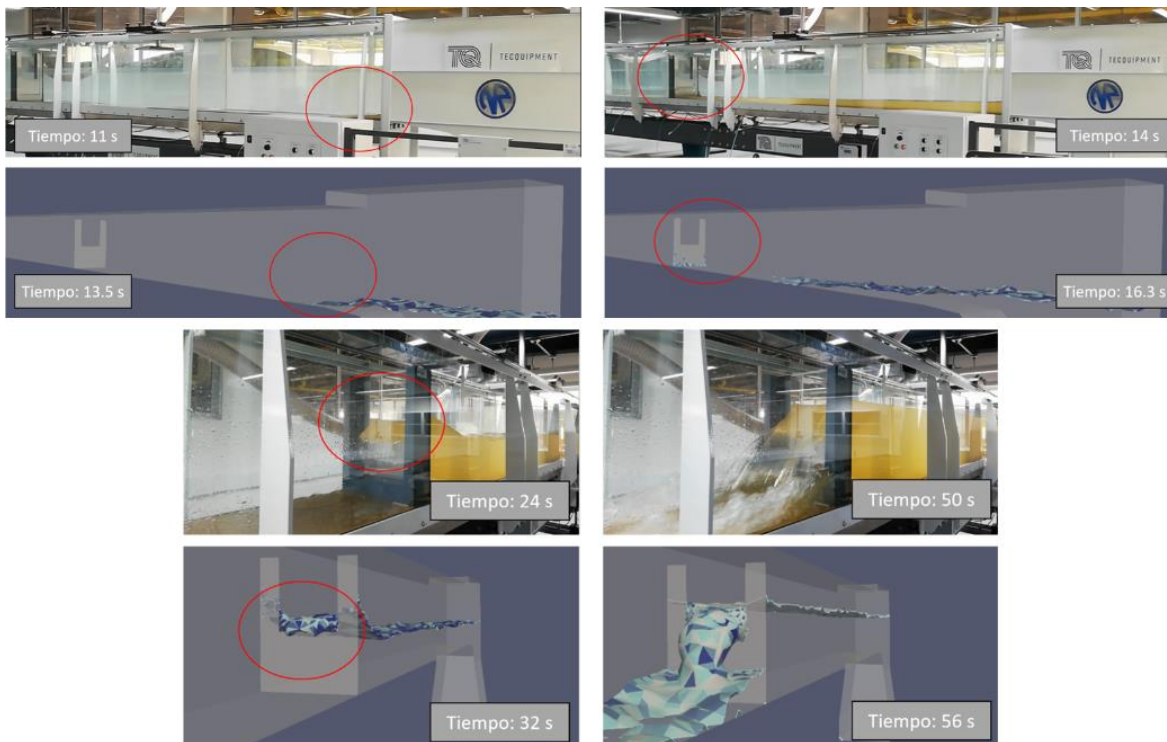


Figura 10-7: Comparaciones temporales de los ítems para el vertedero rectangular.

Fuente: Autor.

En el caso del vertedero rectangular, existen variaciones temporales entre la modelación y el ensayo, pero en sí, no son tan importantes teniendo en cuenta las variaciones en el caudal del ensayo (Figura 10-6). Dichas variaciones se pueden ver reducidas en cuanto avanza el tiempo y el caudal se torna más estable, en el ensayo de laboratorio, en torno a los 15 L/s.

En la Tabla 10-3, la variación con respecto al anterior nos permite entender cambio entre intervalos de tiempo.

Ítem	T. en Vertedero Triangular (s)		Variación con Respecto al Anterior (s)	
	Laboratorio	Modelación	Laboratorio	Modelación
Primer flujo en el canal	12	36.9	-	-
Flujo toca el vertedero	16	40.2	4	3.3
Comienza a verter	33	91.9	17	51.7
Flujo estable	78	112.0	45	20.1

Tabla 10-4: Desplazamiento temporal de la masa de agua para el ensayo y laboratorio de vertedero triangular.

Fuente: Autor.

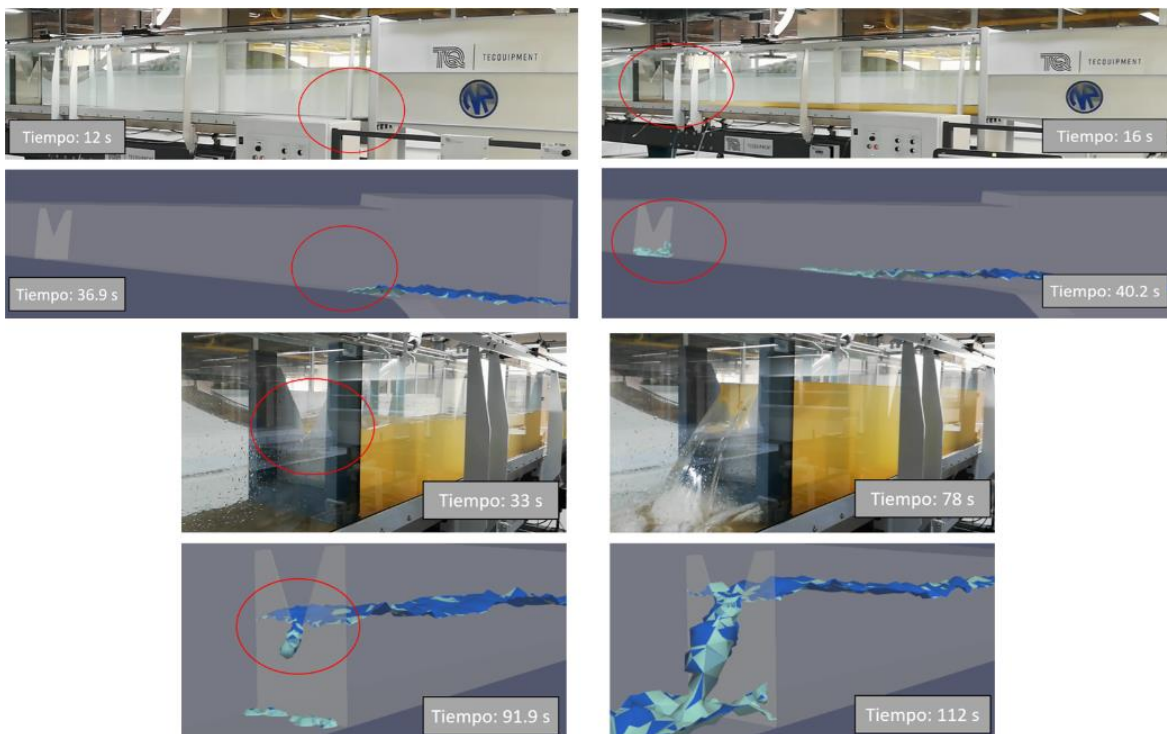


Figura 10-8: Comparaciones temporales de los ítems para el vertedero triangular.

Fuente: Autor.

Para el caso del vertedero rectangular el desfase temporal, con respecto a la modelación y el ensayo, se hace mucho más notorio en correspondencia de los grandes cambios que tienen el valor del caudal en el ensayo. Incluso en los momentos más avanzados de la modelación, cuando el flujo empieza a ser estable, sigue existiendo una brecha de ceca de 30 segundos. Lo anterior teniendo en cuenta que según la Figura 10-6, el caudal para este ensayo comienza a estabilizar cerca a los 5 L/s, apenas hasta después del segundo 60.

11.RESULTADOS E IMPACTOS

11.1. RESULTADOS

Se generaron los resultados enlazados a los objetivos específicos y que son el indicador de cumplimiento de los mismos, así, son función directa del objetivo principal.

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Selección del software CFD para modelar el proyecto.	A partir de un listado variado se seleccionó el software OpenFOAM como la mejor opción para el desarrollo de las modelaciones.	Analizar un mínimo de tres (3) <i>software CFD</i> , con el fin de seleccionar la opción más viable que permita realizar la modelación de los ensayos bajo parámetros de accesibilidad a la licencia, fiabilidad de los resultados, estética de la representación gráfica de los resultados y demás que resulten necesarios en la evaluación.
Modelación terminada del ensayo de vertedero del canal hidráulico en el software CFD seleccionado.	Se estableció el tipo de análisis, las condiciones de frontera y el solucionador con todas sus variables y se ejecutaron dos modelaciones completas para los ensayos propuestos.	Realizar la modelación matemática basada en la Dinámica de Fluidos, en el <i>software CFD</i> seleccionado, las condiciones de los ensayos de vertedero rectangular y vertedero triangular de la manera más cercana a la realidad que permitan los recursos.
Presentación del modelo en 3D en el tiempo de manera gráfica.	Junto con el análisis de las variables y anexo digital al presente documento, se elaboraron archivos de video que presentan el comparativo de las modelaciones y los ensayos	Analizar y presentar los resultados obtenidos a partir de la modelación, resaltando el comportamiento de las variables en el tiempo, de manera similar al ensayo real al realizado en el Canal Hidráulico.

Tabla 11-1: Resultados.
Fuente: Autor.

11.2. IMPACTOS

La modelación en CFD del Canal Hidráulico abre la puerta a variables que pueden generar ciertos impactos en diferentes ámbitos. Los mencionados impactos se relacionan a continuación:

Aspecto	Impacto	Supuesto	Plazo
Académico	Mayor interés por parte de la comunidad académica en cuanto a los softwares CFD y la mecánica de fluidos	Entender de manera más práctica y visual los comportamientos dinámicos de los fluidos y la utilización de TICs para el aprendizaje conlleva a generar interés en dichos temas por parte de la comunidad académica.	Corto
Científico	Aumento en la investigación de dinámica de fluidos computacional y ensayo en canal hidráulico en la región.	Conocimiento de tecnologías poco aplicadas en la región para la investigación conllevan a generación de mayor producción investigativa.	Mediano
Social	Mejores herramientas para el manejo de los recursos hídricos de la región.	El conocimiento científico producto de las diferentes modelaciones CFD puede llevar a la generación o renovación de herramientas para el manejo y cuidado de los recursos hídricos de la región.	Largo
Técnico	Proyección de los modelos de calibración para el canal hidráulico.	Comparar datos de los resultados de ensayos en el canal hidráulico contra los obtenidos de la modelación matemática en el software CFD generará un ítem comparativo con el cual se podrá definir la necesidad de calibración, los parámetros a calibrar y las frecuencias de las calibraciones del Canal Hidráulico del laboratorio de Recursos Hídricos.	Corto

Tabla 11-2: Posibles Impactos Generados.
Fuente: Autor.

12. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

12.1. CONCLUSIONES

Aunque OpenFOAM no es la herramienta CFD más utilizada en la industria de la ingeniería, sin estar en un lugar despreciable, sí es el software más usado en el campo académico. La posibilidad de revisar en el código cada ecuación, algoritmo y parámetro permite la mejor comprensión de los fenómenos a analizar, desde el punto de la física y, no menos importante, tener la capacidad de realizar modificaciones a los *solvers* existentes o crear alguno propio a partir de los existentes.

Los tiempos de cálculo para los ensayos CFD tienen relación directa con la capacidad de cómputo que esté al alcance del usuario. Como se identifica en la Tabla 9-5, para el caso de las modelaciones que atañen el desarrollo de este proyecto, tomaron días para llevarse a cabo. Para realizar modelaciones de mayor escala o a mayor detalle es necesario contar con más recursos en cuanto a software.

Desde el punto de la comparación de las alturas de láminas de agua y filos de las láminas vertientes, se puede establecer que se logró una gran fidelidad entre las modelaciones y los ensayos. Si bien se pueden encontrar variaciones, menores a los 5 cm en algunos casos, estas tienen a reducirse aumentando la calidad del mallado. Lo anterior teniendo en cuenta que los momentos, si bien son cuando el flujo era más estable, son diferentes.

La condición del canal para ensayos hidráulicos, en cuanto al control del caudal se refiere, generan discrepancias importantes en el análisis de presiones y cambios volumétricos de la masa de agua. Los tiempos en que se presentan los fenómenos analizados, como se analiza en las Secciones 10.2 y 10.3, son circunstancialmente diferentes debido a que, en caso contrario a los ensayos, dentro de la simulación si se pudo establecer un caudal constante.

12.2. TRABAJOS FUTUROS

Una variable que podría llevar a una mayor profundización en cuanto a los conocimientos en la Dinámica de Fluidos Computacional, es la adición de los modelos turbulentos en simulaciones similares a esta. Esto permitirá explorar, de manera más específica, los algoritmos de solución de las ecuaciones de continuidad y transporte y, los modelos RANS y k- ϵ para el análisis de vorticidades.

En el desarrollo de las modelaciones, se pudo establecer la posibilidad de, mediante estas, calibrar los valores de coeficientes de descarga tanto para los vertederos

rectangulares como para los triangulares. Esto permitirá la estandarización de estos, en cuanto menos, para las condiciones del laboratorio de Hidráulica de la Sede.

Por último, si se cuenta con hardware de altos recursos de cómputo, se podría realizar la misma modelación bajo las mismas condiciones y con las mismas variables en diferentes softwares CFD. Realizar un comparativo en cuanto al rendimiento y la calidad de las modelaciones podría establecer un buen punto de partida para otros trabajos del área.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Moukalled, L. Mangani and M. Darwish, *The finite volume method in Computational Fluid Dynamics.*, New York: Springer International Publishing, 2016.
- [2] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*, 3th ed., New York, EE.UU.: McGraw Hill, 2012.
- [3] A. Rodríguez Díaz, *Hidráulica Experimental*, Bogotá, D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000.
- [4] J. C. Arango Escobar, «Analysis of Hydrodynamic Forces on High-Head Slide Gates Using Computational Fluid Dynamics (Tesis de Maestría),» Medellín, 2018.
- [5] Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC, *Diagnóstico del agua en las Américas por Red Interamericana de Académicas de Ciencia*, Ciudad de México: FCCyT, 2012.
- [6] J. Tu, G. H. Yeoh y C. Lui, *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.
- [7] J. M. Fernández Oro, *Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos.*, Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A., 2012.
- [8] T. Kajishima y K. Taira, *Computational Fluid Dynamics: Incompressible Turbulent Flows*, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [9] X. Lui y J. Zhang, *Computational Fluid Dynamics: Applications in Water, Wastewater and Stormwater Treatment*, Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2019.
- [10] O. C. Zienkiewicz, *El método de los elementos finitos*, Barcelona, España: Editorial Reverte, 2017.
- [11] R. J. LeVeque, *Finite Volumen Methods for Hyperbolic Equations*, Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [12] A. Villamizar Hernández, *Aplicación de un modelo turbulento*, Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [13] R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos*, México: Pearson, 2006.
- [14] S. V. Patankar y D. B. Spalding, «A Calculation Procedure for Heat,» *International Journal of Heat and Mass Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows*, vol. 15, pp. 1787 - 1806, 1972.
- [15] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [16] R. I. Issa, «Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting,» *Journal of Computational Physics*, vol. 62, pp. 40 - 65, 1985.

- [17] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, New York: Longman Scientific & Technical, 1995.
- [18] H. Chanson, The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004.
- [19] TecQuioment Ltd., Flow Channel FC300, User Guide, London, England: TecQuioment Ltd., 2018.
- [20] J. C. Arango Escobar, «Analysis of Hydrodynamic Forces on High-Head Slide Gates Using Computational Fluid Dynamics (Tesis de Maestría),» Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2018.
- [21] C. E. Llano Serna, Process Modeling and Simulation, Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2018.
- [22] The OpenFOAM Foundation, OpenFOAM, User Guide, The OpenFOAM Foundation, 2020.