



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**TITULO DEL TRABAJO DE GRADO:
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.**

**PRESENTADO POR:
LEIDY LORENA CUENCA GAONA CÓDIGO: 505807**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
ALTERNATIVA TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ, D. C., 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.**

LEIDY LORENA CUENCA GAONA CÓDIGO: 505807

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniera civil

**Director de trabajo
DIEGO ALEJANDRO PULGARIN
Ingeniero Sanitario**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
BOGOTÁ, D. C., 2019**



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

TABLA DE CONTENIDO

1 GENERALIDADES	12
1.1 LINEA Y TIPO DE INVESTIGACIÓN: SOFTWARE INTELIGENTE Y CONVERGENCIA TECNOLÓGICA.	12
1.1.2 Eje temático: hidráulica de canales	12
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.4 ANTECEDENTES	13
1.4.1 Ecuaciones de descarga de flujo libre	15
1.5 JUSTIFICACIÓN	15
1.6 OBJETIVOS	16
1.6.1 Objetivo general	16
1.6.2 Objetivos Específicos	16
1.7 ALCANCE	17
1.8 LIMITACIONES	17
2 MARCO DE REFERENCIA	18
2.1 MARCO TEORICO	18
2.2 MARCO CONCEPTUAL	20
2.2.1 QUE ES UNA CANALETA PARSHALL.....	20
2.2.2 FUNCIONAMIENTO DE UNA CANALETA PARSHALL.....	21
2.2.3 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA CANALETA PARSHALL	21
2.2.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA CANALETA PARSHALL.....	21
2.2.5 QUE ES OPENFOAM	22
2.2.6 CARACTERISTICAS DE OPENFOAM.....	22
2.2.7 CONVERGENCIA.....	23
2.2.8 METODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	24
2.2.9 CFD	24
2.3 DIFUSION NÚMÉRICA	24
2.3.1 DIFERENCIA FINITA	25
2.3.2 QUE ES SALOME	25
2.3.3 QUE ES PARAVIEW	26
3 METODOLOGIA	27
3.1 Metodología a emplear	27
3.1.1 Fase I:.....	27

3.1.1.1 Toma experimental de datos en Laboratorio.	27
3.2 FASE II: PRE-PROCESSING	31
3.2.1 Modelación de la canaleta Parshall en OpenFoam	31
3.2.2. Pre-processing.	32
3.2.2.1 Realización geometría Canaleta Parshall.....	33
3.2.2.2. Generación mallas en Salome.	34
3.3 FASE III: RUNNING THE CODE.....	37
3.3.1.3 Condiciones de contorno	40
3.3.1.4 Condiciones iniciales, estimación de la velocidad de entrada	41
3.3.1.5 Condiciones de presión	42
3.3.1.6 Estimación de numero de Courant	42
3.4 FASE III: POST-PROCESSING.....	43
4 RESULTADOS	45
4.1 Resultados modelo físico	45
4.2 Resultados modelo numérico.....	50
4.2.1 Interdependencia de la malla Perfiles residuales.....	51
4.3 Perfiles de velocidad:.....	54
4.4. Generación de geometría y mallas para obstáculos dentro del canal	57
4.5 Comparación resultados modelo numérico y modelo físico.....	59
4.6 Comparación de los perfiles de velocidad del flujo.....	65
5. CONCLUSIONES.....	67
6. RECOMENDACIONES.....	68
7. ANEXOS	69
7.1 ANEXO 0. ANTEPROYECTO Y RUBRICA APROBADA	69
7.2 ANEXO 1. ENSAYOS LAB TESIS.....	69
7.3 ANEXO 2. SOPORTES AUTOCAD	69
7.4 ANEXO 3. SOPORTES SALOME.....	69
7.5 ANEXO 4. CONTROL TETRA.....	69
7.6 ANEXO 5. CALCULOS DE CONTROL SIMULACION HEXA	69
7.7 ANEXO 6. SOPORTES OPENFOAM.....	69
7.8 ANEXO 7. ANALISIS DE DATOS ISOLINEAS	69
7.9 ANEXO 8. SOPORTES GNUPLOT	69
7.10 ANEXO 9. FOTOGRAFIAS	69

8. BIBLIOGRAFIA 70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema y partes de una canaleta Parshall.....	20
Figura 2 Dimensiones del medidor Parshall.....	21
Figura 3. Dato Caudal de diseño o entrada	28
Figura 4. Vista panorámica condiciones iniciales	29
Figura 5 Obstáculos tipo rectangular.	29
Figura 6. Obstáculos tipo vertedero.....	29
Figura 7. Obstáculos tipo bloque.	30
Figura 8. Canaleta Parshall. Universidad Católica de Colombia.	30
Figura 9. Canaleta Parshall y Canal. Universidad Católica de Colombia.....	31
Figura 10. Esquema estructura de control CFD	32
Figura 11. Ejemplo generación de malla para un elemento cilíndrico.	33
Figura 12. Geometría en AutoCAD.	33
Figura 13. Malla 1X.....	34
Figura 14. Malla 2X.....	35
Figura 15. Malla 3X.....	36
Figura 16. Malla 4X.....	36
Figura 17 Ventana de entrada OpenFoam.	37
Figura 18. Carpetas modelo OpenFoam.	37
Figura 19. Ventana principal Paraview.....	43
Figura 20 .Ventana principal ParaView.	44
Figura 21 Malla obstáculo a 3.6 m	57
Figura 22.Malla obstáculo a 2.8 m	58
Figura 23. Malla obstáculo a 2.0m	58
Figura 24.Malla obstáculo a 1.6 m	58
Figura 25. Isolíneas a través del canal.....	59
Figura 26.Puntos de corte entrada Canaleta Parshall	60
Figura 27. Puntos de corte garganta canaleta Parshall.....	60
Figura 28. Puntos de corte salida canaleta Parshall.....	61
Figura 29. Coordenadas puntos de corte.	61
Figura 30. Metodología para cortes y toma de datos de OpenFoam a través de ParaView	62
Figura 31. Resultados cortes OpenFoam.	62
Figura 32. Perfil de velocidad dentro del canal	65
Figura 33. Perfil de velocidad contorno.....	65
Figura 34. Distribución de la velocidad en diferentes canales	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones Generales y aforo de Caudal	28
Tabla 2. Características del flujo, hipótesis del caso	38
Tabla 3. Condiciones de presión.....	42
Tabla 4.CASO BASE: sin obstáculos a lo largo del canal.....	45
Tabla 5.CASO 1: Obstáculo a 3.6 m. 10.28 veces ancho de la garganta.....	46
Tabla 6. CASO 2: Obstáculo 2.8 m. 8 veces ancho de la canaleta.....	47
Tabla 7. CASO 3: OBSTACULO 2 m. 5.71 veces ancho de la garganta.....	48
Tabla 8. CASO 4: OBSTACULO 1.6 m. 0.45 veces ancho de la garganta.....	49
Tabla 9. Resultados laminas de agua OpenFoam.....	50
Tabla 10. Comparativo Datos modelo numérico- datos modelo físico.	64

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Calculo caudal de descarga.....	15
Ecuación 2. Ecuación de continuidad.....	22
Ecuación 3. Ecuación Conservación del Momentum Incompresible,	23
Ecuación 4. Numero de Reynolds.	39
Ecuación 5. Ecuación de la continuidad Incompresible	40
Ecuación 6. Ecuación Conservación del Momentum Incompresible	40
Ecuación 7. Cálculo de caudal.....	41
Ecuación 8. Área canal.....	41
Ecuación 9. Ecuación de Courant-Friedrich-Levy	43

INDICE DE GRAFICAS

Grafica 1. Perfiles residuales para todas las mallas.....	51
Grafica 2. Perfiles residuales para malla 1X.....	51
Grafica 3. Perfiles residuales para malla 2X.....	52
Grafica 4. Perfiles residuales para malla 3X.....	52
Grafica 5. Perfiles residuales para malla 4X.....	53
Grafica 6. Perfil de velocidad 1X.....	54
Grafica 7. Perfil de velocidad 2X.....	55
Grafica 8. Perfil de velocidad 3X.....	55
Grafica 9. Perfil de velocidad 4X.....	56

INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años se ha venido implementando la canaleta Parshall como instrumento medidor de flujo gracias a sus amplias capacidades se le atribuye como un excelente aforador y es utilizada en muchas estructuras hidráulicas.

Pero es claro que el dimensionamiento de la estructura está ligado a varios patrones que determinan su comportamiento y de paso restringen su uso. Es el caso de la longitud de aproximación a la entrada de la canaleta, que no es más que una distancia clave para el comportamiento del flujo dentro del canal. A través de la historia se han realizados varios estudios que pretenden establecer una longitud de aproximación exacta y conveniente a la hora de tomar mediciones, pero se ha divagado un poco en las teorías propuestas, hay quienes relacionan esta longitud con el ancho de la garganta y otros autores proponen unas condiciones para el flujo antes de la entrada al canal.

Para facilitar la determinar de esta longitud y así poder dimensionar una estructura adecuada, aparecen software que junto con ensayos de laboratorio determinan buenas características para definir una variable tan clave como la longitud de aproximación.

1 GENERALIDADES

1.1 LINEA Y TIPO DE INVESTIGACIÓN: SOFTWARE INTELIGENTE Y CONVERGENCIA TECNOLÓGICA.

1.1.2 Eje temático: hidráulica de canales

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La dinámica de fluidos computacional en los últimos años ha tenido un gran índice de implementación en diversas áreas de la ingeniería debido a su efectividad y mejoramiento en el proceso de datos en los ordenadores, “es por esto por lo que se ha convertido en una herramienta muy útil para determinar el comportamiento de los fluidos en procesos industriales”¹.

La necesidad de evaluar el comportamiento de diferentes estructuras (entre ellas hidráulicas), ha generado la creación e implementación de diferentes softwares con el fin de agilizar y dar eficacia a los procesos de investigación y diseño. La modelación en este tipo de software tiene como base la construcción de volúmenes a través de elementos finitos de tipo Hexaedro o triangular y realiza codificaciones en base a ecuaciones diferenciales. Esta tecnología provee en el campo ambiental resultados de simulaciones para la interpretación y solución de problemas asociados a la modelación de fluidos en sistemas monofásicos y Multifásico (Foundation, 2014).²

En los sistemas hidráulicos es muy común encontrar canaletas Parshall para la medición de flujo, estas tienen una amplia gama de usos. Pero para que un canal Parshall funcione correctamente, es importante seguir ciertas pautas al seleccionar un sitio e instalar el canal. En particular, las condiciones aguas arriba son de importancia crítica. Es tentador decir que simplemente no hay espacio para colocar el canal, que puede hacer trampas en el tramo recto aguas arriba, etc. Desafortunadamente, condiciones de flujo aguas arriba malas pueden causar grandes errores de medición de flujo.³

Varios autores proponen una longitud de aproximación diferente, está condición

¹ Aubin J., Fletcher D. F., y Xuereb C. (2004). Modeling turbulent flow in stirred tanks with CFD: the influence of the modeling approach, turbulence model and numerical scheme. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28(5), 431-445

² Foundation, O. (2014). OpenFOAM - The Open Source CFD Toolbox - User Guide. *User Guide*, 222.

³ N.A. (N.A). Condiciones previas para los canales de parshall. N.A , de Open Channel Flow Sitio web: <https://www.openchannelflow.com/blog/upstream-conditions-for-parshall-flumes>.

ligada a un sin número de características propias del diseño, entre ellas ancho del canal, longitud del tramo recto y ancho de la garganta. Pero finalmente y luego de analizar varias teorías no se encuentra establecido un criterio de uniformidad para la determinación de esa longitud mínima de aproxima a la canaleta en donde sus niveles de medición no se verán afectados por los obstáculos que se encuentren en el tramo recto.

¿Cuál es la longitud mínima de aproximación a la canaleta Parshall con un ancho de garganta de 1 1/8 pulgadas donde no se verá afectada como elemento medidor de flujo?

1.4 ANTECEDENTES

Fue **Ralph Parshall (1881-1959)** quien, constatando las dificultades de medición de caudales en cauces, **desarrolló un instrumento que implementado en un canal es capaz de medir el paso del flujo mediante una relación inequívoca con el calado.**

Vinculado con la Colorado State University (entonces Colorado Agricultural College), cuando se enroló en su laboratorio de hidráulica inició sus estudios sobre la medición de flujo, que culminaron a principios de los años 20 del siglo XX, cuando **presentó la patente en 1921 del "Venturi-flume water-stage-recording instruments", que le fue otorgada un año después en 1922.**

Su patente ha sido, y sigue siendo, uno de los instrumentos de medición de flujo en lámina libre más extensamente implementado en cauces, canales de riego, redes de saneamiento, procesos de tratamiento y depuración de aguas, vertidos, etc. La caracterización hidráulica de los flujos en canales abiertos o lámina libre ha sido una tarea que trajo de cabeza a numerosos científicos a lo largo de la historia. Fue su tratamiento como concepto de energía lo que permitió dar el salto definitivo en el estudio del movimiento de fluidos y el desarrollo de las distintas teorías y formulaciones que posteriormente permitieron la caracterización hidráulica del mismo.

Es en el siglo XVIII cuando Daniel Bernoulli plantea en sus estudios de hidrodinámica los conceptos de altura y conservación de la energía que posteriormente implementó Leonhard Euler en la ecuación que al final acabaría adoptando el nombre del primero como reconocimiento a sus pioneros logros.

A lo largo de estos casi tres siglos, el conocimiento en este campo ha ido avanzando gracias a nombres como Venturi, Chezy, Manning o Bakhmeteff, que formularon expresiones y teorías fundamentales en la comprensión del comportamiento de los fluidos... Y basándose en todos estos conocimientos, Ralph Parshall desarrolló su estudio que derivó finalmente en su patente.⁴

⁴ Oliveras J.,. (2016). Canal Parshall, el aforador con casi un siglo de historia. 2018, de iagua Sitio web: <https://www.iagua.es/blogs/jordi-oliveras/canal-parshall-aforador-casi-siglo-historia>

En el pasado, era común dimensionar y establecer canales para un 95 por ciento de inmersión para reducir profundidades de flujo de aproximación de 4 a 6 pulg. Aunque existen métodos de corrección para determinar la descarga sumergida, el diseño de canales para la medición de flujo sumergido ya no se considera una buena práctica de diseño porque compromete la precisión. Por ejemplo, la imprecisión de la medición de la cabeza aumenta el error de descarga de 4 a 20 por ciento sobre la precisión de flujo libre primaria de 3 a 5 por ciento. Además, un estudio reciente (Peck, 1988) encontró una discontinuidad del 12 por ciento en la función de corrección de sumersión para un canal de 1 pie dependiendo de si el cabezal de medición río abajo resulta de una superficie de agua que cae o sube.

Por lo general, no se recomienda diseñar y configurar canales Parshall para medición de flujo sumergido, ya que se pueden diseñar canales de cuello largo menos costosos que se acerquen o superen los límites de sumersión de 90 por ciento con una sola medición de la cabeza aguas arriba. Además, la caída absoluta requerida en la superficie del agua suele ser menor para los canales de garganta larga, en particular los estilos modificados de vertederos de cresta amplia.

Debido a que muchos canales Parshall están actualmente en uso, la parte restante de esta sección se refiere principalmente a dimensiones estructurales para verificar canales existentes, ecuaciones para descargas informáticas, tablas de descarga de flujo libre para cada canal de tamaño, gráficos para correcciones de medición de descarga sumergida y curvas de pérdida de carga para evaluar los cambios de profundidad aguas arriba causados por cambios de profundidad de entrega aguas abajo.

Se debe tener cuidado para construir canales Parshall de acuerdo con las dimensiones estructurales. Este factor se vuelve más importante a medida que el tamaño se reduce. La porción del canal aguas abajo desde el final de la sección convergente no necesita construirse si el canal ha sido configurado para flujo libre donde no se espera que opere por encima del límite de sumersión. Esta versión truncada del canal de Parshall a veces se conoce como el canal de Montana. No se pueden determinar las correcciones o descargas de sumersión para los canales de Montana u otros canales de Parshall modificados porque no incluyen la parte del canal de Parshall completo donde el cabezal de sumersión, h_b , se midió durante la calibración. Diferentes tamaños Los canales de Parshall no son geoméricamente proporcionales. Por ejemplo, una dimensión en el canal de 12 pies no se puede suponer que sea tres veces la dimensión correspondiente en el canal de 4 pies. Cada uno de los canales de la figura 8-9 es un dispositivo estándar y se ha calibrado para el rango de descargas que se muestra en la tabla. Los canales pueden medir confiablemente la descarga de flujo libre dentro de "3 a 5 por ciento", más un error de detección de cabezal, si se alcanzan las dimensiones estándar durante la

construcción, el canal está correctamente configurado y el canal es operado y mantenido de acuerdo con los procedimientos recomendados.⁵

1.4.1 Ecuaciones de descarga de flujo libre

Los canales de Parshall se calibraron empíricamente para generar la clasificación de flujo libre frente a descarga para los canales de 1 a 50 pies. Algunos de los tamaños más grandes no se calibraron directamente, sino que se modelaron a escala. Las ecuaciones de descarga de flujo libre para los tamaños de canal Parshall estándar son de la siguiente forma⁶:

Ecuación 1. Cálculo caudal de descarga.

$$Q = Ch_a^n$$

Fuente: https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/chap08_10.htm

!

h_a = cabeza de medición (pies)

Q = descarga (pies³ / s)

C y n para cada ancho de garganta.

1.5 JUSTIFICACIÓN

La canaleta Parshall como estructura hidráulica tiene una amplia gama de usos dentro del campo de la ingeniería. Uno de los tantos usos es la medición de caudal o flujo que pasa por determinado punto de esta, para que su comportamiento en cuanto a elemento medidor de flujo sea acertado y eficaz, se debe realizar el análisis de varios parámetros o condiciones de entrada que permitirán el adecuado funcionamiento de la canaleta.

Uno de los parámetros claves a la hora del diseño del medidor de flujo, es la longitud de aproximación a la canaleta, se debe tener claro que esta longitud está relacionada con el ancho de la garganta.

A raíz de no encontrar un criterio teórico de uniformidad en cuanto a la definición de esta variable, se decide realizar la presente investigación con el fin de establecer una longitud mínima de aproximación en donde la canaleta no presente afectación en sus niveles de medición.

⁵ Bureau of Reclamation: Managing Water in the West. (1997). USBR Water Measurement, Chapter 8. Section 10. Parshall Flumes, de Chapter 8-FLUMES Sitio web: https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/chap08_10.html

⁶ ASTM. *Standard D 1941-9. 2001 Standard Test Method for Open Channel Flow Measurement of Water with Parshall Flume.* New York: American National Standard.

Para esto se realizarán varios ensayos de laboratorio y una modelación numérica en la herramienta computacional OpenFoam, estableciendo una calibración apropiada entre los dos modelos y así obtener resultados más exactos.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo general

Modelar y analizar el comportamiento hidráulico de una canaleta Parshall en un modelo a escala de laboratorio y haciendo uso de la herramienta computacional Openfoam de tal manera que se pueda determinar la longitud mínima de aproximación a partir de la cual dicha canaleta no se vea afectada como instrumento de medición del flujo.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Determinar en un modelo a escala de laboratorio la longitud mínima en la cual se puede ubicar una estructura aguas arriba de la transición de entrada a la canaleta Parshall, sin alterar el comportamiento hidráulico de la canaleta como medidor del flujo.
- Modelar y analizar el comportamiento hidráulico de la canaleta Parshall en Openfoam.
- Calibrar el modelo hidráulico a partir de la herramienta computacional Openfoam de tal manera que se pueda comprobar la exactitud del modelo en la representación del fenómeno físico analizado.
- Comparar el comportamiento del flujo al variar la longitud mínima de aproximación a la canaleta Parshall tanto en el modelo como en el modelo numérico configurado en Openfoam.
- Analizar el efecto que tiene la longitud de aproximación a la canaleta Parshall en el tamaño de la malla y en el comportamiento hidráulico en el OpenFoam.

1.7 ALCANCE

- Calibración apropiada del modelo numérico, de tal forma que muy similar al modelo físico que se tiene en el laboratorio
- Evaluación de diferentes escenarios, con el fin de determinar la longitud mínima de aproximación a la canaleta
- Por medio de los ensayos del laboratorio y de la herramienta computacional se desea variar las condiciones de entrada de tal forma que estas permitan recrear diferentes casos para evaluación de perfiles de flujo y longitudes de aproximación
- Se pretende realizar una amplia investigación acerca del uso de los softwares empleados en la dinámica de fluidos y de esta manera incentivar su uso.
- La implementación de software como OpenFoam, resultan muy útiles a la hora de diseñar y dar respuesta a muchos de los problemas que se presentan en los procesos constructivos, por medio de la presente investigación se desea mostrar las ventajas del manejo de estas herramientas tecnológicas.

1.8 LIMITACIONES

- El diseño constructivo de Canaleta Parshall que ofrece la Universidad, pues a raíz del diseño presenta problema a la hora de tomar mediciones.
- Una de las limitaciones a la hora de la modelación en OpenFoam estaría enfocada a las condiciones del flujo que se desea simular, pues debe tener muy clara que propiedad se manejarán y como se realizará la selección de estas variables de entrada
- La canaleta Parshall que se encuentra en el laboratorio de la Universidad, limita la investigación en cuanto a niveles de medición, pues solo se tomarán datos en cuanto a lámina de flujo.

2 MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEORICO

Se han desarrollado varios estudios sobre el comportamiento y la medición del flujo en canales abiertos (canaleta Parshall), un documento importante en el análisis del comportamiento de la canaleta Parshall como elemento cuantificador del flujos es la norma ISO 9826:1992 (E) esta Norma Internacional especifica métodos de medición de flujo de líquido en canales abiertos (particularmente en canales de riego) bajo constante o lentamente condiciones variables de flujo, usando Parshall y SANIIRI Canales Estos canales están diseñados para operar condiciones de flujo libre y de sumergencia.⁷

Savage (2013), Heiner (2013), Barfuss (2013) realizaron una investigación, en donde proponen un modelado físico, con el objetivo de asignar correcciones a las clasificaciones de descarga de las canaletas Parshall donde se usa una ubicación de medición incorrecta del cabezal aguas arriba H_a (H_d está en la ubicación correcta) o una configuración inapropiada de entrada en la pared lateral está instalada. El estudio incluyó un canal acrílico de Parshall de 61.0 cm, construido de acuerdo con las especificaciones de diseño (Parshall, 1936), e instalado en un canal de prueba de 243.8 cm de ancho en el laboratorio de hidráulica. La cresta del canal se elevó a 44.5 cm del piso del canal de prueba. Descarga de canal de Parshall coeficientes de corrección a través de modelado Se instaló un modelo físico en el Utah Water Research Laboratory en Logan, EE. UU. Con el objetivo de asignar correcciones a las clasificaciones de descarga de los canales de Parshall donde se usa una ubicación de medición incorrecta del cabezal aguas arriba H_a (H_d está en la ubicación correcta) o una configuración inapropiada de entrada en la pared lateral está instalada. El estudio incluyó un canal acrílico de Parshall de 61.0 cm, construido de acuerdo con las especificaciones de diseño (Parshall, 1936), e instalado en un canal de prueba de 243.8 cm de ancho en el laboratorio de hidráulica. La cresta del canal se elevó a 44.5 cm del piso del canal de prueba. Se usó una rampa de aproximación sólida con una pendiente horizontal a vertical de 4: 1 para hacer la transición del piso del canal de prueba al piso de aproximación del canal de Parshall. El canal de prueba consistió en 40.84 m de recta sin obstrucciones canal que contenía una serie de paredes deflectoras y supresores de ondas flotantes, proporcionando 22.86 m de aproximación sin ondas. El flujo en el canal se midió con un medidor de flujo magnético de 15.24 o 60.96 cm calibrado por los autores con 0.5% de precisión El modelo físico se usó para crear

⁷ Norma ISO 9826, 1992, Measurement of liquid flow in open channels - Parshall and SANIIRI flumes

correcciones contables ubicaciones de medición de la cabeza incorrectas y configuraciones de pared de ala no estándar. Los resultados indicaron que las mediciones de cabeza tomadas en ubicaciones distintas a la ubicación especificada por Parshall (2A / 3) pueden producir hasta 60% de errores en el flujo medida, pero puede corregirse dentro del 3-5% en la mayoría de los casos si se usan los coeficientes de corrección correctos proporcionados por Heiner y Barfuss (2011). Además, la falta de paredes laterales y el diseño incorrecto y la instalación de paredes laterales pueden provocar la formación de ondas estacionarias en la sección de aproximación del canal, lo que también puede afectar la precisión de la medición del flujo hasta un 5% adicional.⁸

Baylar (2009), Aydin (2009), Unsal (2009) y Ozkan (2009) llevaron a cabo una investigación en donde a medida que el agua pasa a través de una restricción en una tubería, forma un vacío al final de la restricción. Un orificio perforado en la tubería en un punto donde se produce esta aspiración provocará que el aire ingrese al flujo principal. Un ejemplo de este mecanismo se ve en el tubo venturi. Cuando existe una cantidad mínima de presión diferencial entre los lados de entrada y salida del tubo venturi, se produce un vacío en los orificios de succión del tubo Venturi.

La aireación Venturi es un método de aireación que se ha popularizado en los últimos años. En la investigación, las tasas de inyección de aire de los tubos Venturi se analizan utilizando CDF (software computacional en dinámica de fluidos). Estos análisis se llevan a cabo mediante el programa FLUENT V6.2 que utiliza la teoría del volumen finito.⁹

Por otro lado y con el auge de los avances tecnológicos en el año 2017 el ingeniero Rojas, propone un modelamiento fenomenológico de canaleta Parshall usando opensource (openfoam 16.10) y sin Flow 3.1 y generación de algoritmo de generación automática de geometría usando diseño hidráulico asistido por computador (CAD) y Python, es este caso el objetivo era proponer un modelo computacional que permitiera diseñar, modelar y evaluar el comportamiento del flujo de una canaleta Parshall con un caudal de operación de 62 l/s diseñada bajo las tablas de referente de dimensionamiento. Buscando brindar de esta manera un modelo tridimensional que permitiera validar el comportamiento de la canaleta Parshall como estructura hidráulica en las PTAR y la optimización de estas.¹⁰

⁸ Savage, B., Heiner, B., y Barfuss, S., (2013). Parshall flume discharge correction coefficients through modelling, *Institution of Civil Engineers publishing*, 167, 279-287

⁹ Baylar, A., Aydin, M., Unsal, M., y Ozkan, F., (2009). Numerical Modeling of Venturi Flows for Determining air Injection Rates using Fluent V6.2, *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 14, No. 2, 97-108.

¹⁰ Rojas, L., (2017). Modelamiento Fenomenológico De Canaleta Parshall Usando Opensource (Openfoam 16.10) Y Simflow 3.1 y Generación De Algoritmo De Generación Automática De Geometría Usando Diseño Hidráulico Asistido Por Computador (Cad) Y Python. *Universidad Manuela Beltrán- sede Bogotá*

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 QUE ES UNA CANALETA PARSHALL

El aforador Parshall es una estructura hidráulica que permite medir la cantidad de agua que pasa por una sección de un canal. Consta de cuatro partes principales:

1. Transición de entrada
2. Sección convergente
3. Garganta
4. Sección divergente

En la transición de entrada, el piso se eleva sobre el fondo original del canal, con una pendiente suave y las paredes se van cerrando en línea recta o circular.

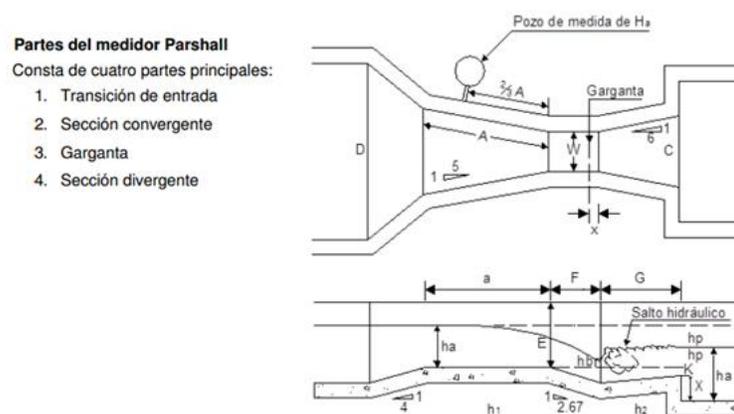
En la sección convergente, el fondo es horizontal y el ancho va disminuyendo.

En la garganta el piso vuelve a bajar para terminar con otra pendiente ascendiente en la sección divergente.

En cualquier parte del aforador, desde el inicio de la transición de entrada hasta la salida del aforador tiene una sección rectangular.

Junto a la estructura del aforador se tiene dos pozos laterales o tanques con la misma profundidad, o mayor, que la parte más baja del aforador. El agua que escurre por el aforador pasa a estos tanques por medio de unas perforaciones colocadas en la pared de la sección y convergente y en la garganta.¹¹

Figura 1 Esquema y partes de una canaleta Parshall.



Fuente: <http://bioplastdepuracion.com/index.php?s=noticia&n=36>

¹¹ Pedroza, E., (2001). Canal Parshall, *serie autodidactica de medición*, pág. 2.

2.2.2 FUNCIONAMIENTO DE UNA CANALETA PARSHALL

Las obras para la regulación de caudales son necesarias cuando el agua se toma de un embalse o cuando un canal de riego se ramifica en dos o más cauces. Los vertederos de regulación están dotados de partes móviles, y su lámina puede desplazarse verticalmente. Manteniendo un nivel casi constante aguas arriba, puede fijarse la altura de carga en relación con la cota del vertedero y, con este dato, conocer el caudal que pasa por él.¹²

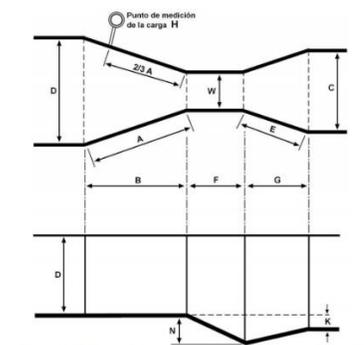
2.2.3 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA CANALETA PARSHALL

Para su fabricación, en los medidores Parshall se han utilizado muy diversos materiales, pudiéndose fabricar de láminas de metal o madera y recientemente de fibra de vidrio. También se pueden construir directamente sobre el terreno con el uso de elementos de mampostería como ladrillos y bloques de concreto y en algunos casos fundidos con concreto reforzado para mayor durabilidad.¹³

2.2.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA CANALETA PARSHALL

Los medidores menos empleados son los de 1 pulg (2.54 cm) de ancho de garganta y el mayor construido hasta hoy mide 50 pies (15.24 m) y tiene una capacidad para 85,000 l/s.

Figura 2 Dimensiones del medidor Parshall.



Fuente: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3165_C.pdf

¹² Bos, M., Reploge, J., Clemmens, A.,(1986). Aforadores de caudal para canales abiertos, *International Institute for Land Reclamation and Improvement*, pag 15.

¹³ Lux M. (2010). Medidores De Flujo En Canales Abiertos. Guatemala: Universidad De San Carlos De Guatemala Facultad De Ingeniería Escuela De Ingeniería Civil.

2.2.5 QUE ES OPENFOAM

OpenFOAM es un Software OpenSource desarrollado por Henry Weller en 1980, basándose en una Toolbox con C++ orientado a objetos (Lucchini, 2008) , con la finalidad de solucionar problemas asociados a fluidos a través del método FVM (FINITE VOLUME METHOD), usando un esquema de preprocesamiento / procesamiento y postprocesamiento(Rusche, 2011) en bibliotecas con una licencia de tipo GNU (General Public Licence)(Vuorinen, Keskinen, Duwig, & Boersma, 2014)¹⁴

2.2.6 CARACTERISTICAS DE OPENFOAM

OpenFOAM soluciona los problemas ingresando un volumen de control y aplicando ecuaciones con Matemática Tensorial, haciendo que problemas de validación de diseños, Verificación de sistemas Hidráulicos y Optimización de diferentes tipos de sistemas sea una tarea sencilla para el campo de trabajo de Ingenieros, Investigadores, Diseñadores ò Innovadores.¹⁵

En el estudio de modelación usando el método de elementos finitos (MEF), se basa en la estimación de parámetros como la velocidad, presión y la relación entre ellas con ecuaciones diferenciales parciales de n orden (Mack & Spruijt, 2013). Entre las hipótesis existentes para el solver IcoFoam, se establece que los fluidos son de tipo Newtonianos, en los que las propiedades físicas permanecen constantes en función del tiempo (Densidad, Viscosidad). En este se usa un algoritmo de acoplamiento Presión – Velocidad (PisoFoam). Para el modelamiento de flujo incomprensible se cuenta con 2 ecuaciones claves. Como son La ecuación de continuidad y Conservación de momentum¹⁶.

Ecuación 2. Ecuación de continuidad

$$\nabla \cdot u = 0$$

Fuente Junhong, 2004

¹⁴ Rojas L. (2017). Introducción a OpenFoam. 2018, de Semillero de Modelación Ambiental (GRUPO SYRAS) - Universidad Manuela Beltrán (Programa Ingeniería Ambiental) Sitio web: <http://modelacionambientalumb.blogspot.com/2017/01/que-es-openfoam-openfoam-es-un-software.html>

¹⁵ Rojas L. (2017). Introducción a OpenFoam. 2018, de Semillero de Modelación Ambiental (GRUPO SYRAS) - Universidad Manuela Beltrán (Programa Ingeniería Ambiental) Sitio web: <http://modelacionambientalumb.blogspot.com/2017/01/que-es-openfoam-openfoam-es-un-software.html>

¹⁶ Rojas, L.,(2017). Modelamiento Fenomenológico De Canaleta Parshall Usando Opensource (Openfoam 16.10) Y Simflow 3.1 y Generación De Algoritmo De Generación Automática De geometría Usando Diseño Hidráulico Asistido Por Computador (Cad) Y Python.

Ecuación 3. Ecuación Conservación del Momentum Incompresible,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) - \nabla \cdot (v\nabla u) = -\nabla p$$

Fuente (Fridolin, 2012)¹⁷

2.2.7 CONVERGENCIA

Antes de estudiar los criterios para garantizar la convergencia en el MEF es necesario definir dicho concepto, en el ámbito del MEF. Se dice que un análisis por el MEF es convergente si al disminuir el tamaño de los elementos, y por lo tanto aumentar el número de nodos y de elementos, la solución obtenida tiende hacia la solución exacta. Hay que indicar que, en el análisis por el MEF, se introducen, además de la hipótesis de discretización, otras aproximaciones, que son fuentes de error en la solución: integración numérica, errores de redondeo por aritmética finita... El concepto de convergencia aquí analizado se refiere solamente a la hipótesis de discretización, prescindiendo de los otros errores, que deben ser estudiados aparte, y cuyo valor debe en todo caso acotarse. Las funciones de interpolación elegidas para representar el estado de deformación de un medio continuo deben satisfacer una serie de condiciones, a fin de que la solución obtenida por el MEF, converja hacia la solución real.

Criterio 1

Las funciones de interpolación deben ser tales que cuando los desplazamientos de los nodos del elemento correspondan a un movimiento de sólido rígido, no aparezcan tensiones en el elemento. Este criterio se puede enunciar también de forma más sencilla: las funciones de interpolación deben ser capaces de representar los desplazamientos como sólido rígido, sin producir tensiones en el elemento. Esta condición es evidente, pues todo sólido que se desplaza como un sólido rígido, no sufre ninguna deformación ni por lo tanto tensión. Sin embargo, adoptando unas funciones de interpolación incorrectas, pueden originarse tensiones al moverse como sólido rígido.

Criterio 2

Las funciones de interpolación deben ser tales que cuando los desplazamientos de los nodos correspondan a un estado de tensión constante, este estado tensional se alcance en realidad en el elemento. Claramente, a medida que los elementos se hacen más pequeños, el estado de tensiones que hay en ellos se acerca al estado uniforme de tensiones. Este criterio lo que exige es que los elementos sean capaces

¹⁷ Fridolin, K. (2012). CFD for air induction systems with OpenFOAM. Thesis, 1–59.

de representar dicho estado de tensión constante. Se observa que este criterio de hecho es un caso particular del criterio 1, ya que un movimiento como sólido rígido (con tensión nula) es un caso particular de un estado de tensión constante. En muchas ocasiones ambos criterios se formulan como un sólo criterio. A los elementos que satisfacen los criterios 1 y 2 se les llama elementos completos.

Criterio 3

Las funciones de interpolación deben ser tales que las deformaciones unitarias que se produzcan en las uniones entre elementos deben ser finitas. Esto es lo mismo que decir que debe existir continuidad de desplazamientos en la unión entre elementos, aunque puede haber discontinuidad en las deformaciones unitarias (y por lo tanto en las tensiones, que son proporcionales a ellas).¹⁸

2.2.8 METODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método del elemento finito es una técnica numérica para resolver problemas que se pueden describir por ecuaciones diferenciales parciales o que pueden ser formulados por medio de una minimización de un funcional (cálculo variacional). El método del elemento finito es una herramienta de análisis muy poderosa que permite obtener soluciones aproximadas a una amplia variedad de problemas de mecánica en el continuo.¹⁹

2.2.9 CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se puede definir como una resolución numérica basada en bucles computacionales y las ecuaciones de masa, momento y conservación de energía para sistemas físicos.²⁰

2.3 DIFUSION NÚMÉRICA

La simulación numérica es una herramienta eficaz en las ciencias aplicadas para la determinación de soluciones y la predicción de su comportamiento sin recurrir a la experimentación. Permite la recreación matemática de procesos físicos que

¹⁸ Formulación por Elementos Finitos. Sitio web:

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70238/fichero/Capitulo+5.pdf>

¹⁹ Introducción al método del elemento finito. Sitio web:

<http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/mecsol/Tema7.pdf>

²⁰ Damasceno F, Da Costa F, Arêdes M, Osorio J, De Fátima I. (2011). Computational Fluid Dynamics (Cfd) And It'S Use For Analysis Of Gas Distribution Inside Animal Production Facilities: A Literature Review. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica Print version ISSN 0123-4226, 14, 88.* 2018, De Scielo Base de datos.

aparecen con frecuencia en el área de ingeniería. El uso de simulaciones numéricas para estudiar ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, en particular la ecuación de difusión requiere normalmente de un cuidadoso estudio de métodos numéricos, de algoritmos a utilizar y de los procesos fundamentales a incluir en la simulación. Una simulación numérica difiere de un modelo matemático en que el primero constituye una representación en cada instante del proceso a simular, mientras que el segundo es una abstracción matemática de las ecuaciones fundamentales necesarias para analizar dicho fenómeno.²¹

2.3.1 DIFERENCIA FINITA

El Método consiste en una aproximación de las derivadas parciales por expresiones algebraicas con los valores de la variable dependiente en un limitado número de puntos seleccionados. Como resultado de la aproximación, la ecuación diferencial parcial que describe el problema es reemplazada por un número finito de ecuaciones algebraicas, en términos de los valores de la variable dependiente en puntos seleccionados. El valor de los puntos seleccionados se convierte en las incógnitas. El sistema de ecuaciones algebraicas debe ser resuelto y puede llevar un número largo de operaciones aritméticas.²²

2.3.2 QUE ES SALOME

SALOME es un software de código abierto que proporciona una plataforma genérica para el procesamiento previo y posterior para la simulación numérica. Se basa en una arquitectura abierta y flexible hecha de componentes reutilizables. SALOME es una solución multiplataforma. Se distribuye como software de código abierto bajo los términos de la licencia GNU LGPL²³

²¹ Millán, Z., Torre, L., Oliva, L; Berenguer, M. . (2011). Simulación numérica. Ecuación de difusión. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica RIBIM / Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNED., N.A, 1. 2018, De Virtual Pro Base de datos.

²² Hernandez G. (N.A). EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS. 2018, de N.A Sitio web: http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/hidrogeologia/NotasCurso/1-MDF1_1-10.pdf

²³ N.A. (2015). Salome: The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation. 2018, de Oficina de software y hardware libre. Universidad Miguel Hernandez de Elche Sitio web: <https://oshl.edu.umh.es/2015/07/20/salome-the-open-source-integration-platform-for-numerical-simulation/>

2.3.3 QUE ES PARAVIEW

Este es el principal software de postprocesamiento distribuido con OpenFoam. Es una herramienta de visualización y análisis de datos de código abierto que se puede invocar mediante el uso de script de envoltura para Foam o convirtiendo los datos a formato VTK y abierto con ParaView. El procesamiento de datos se puede hacer de forma interactiva en un entorno 3D o mediante el procesamiento por lotes de la línea de comandos.²⁴

²⁴ Fridolin, K. (2012). CFD for air induction systems with OpenFOAM. Thesis, 1–59

3 METODOLOGIA

3.1 Metodología a emplear

3.1.1 Fase I:

Se realizarán una serie de ensayos de laboratorio, en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia.

Para el estudio se utilizará una canaleta Parshall que para efectos constructivos presenta un ancho de garganta de 1.37 pulgadas aproximadamente, el ensayo consiste en prolongar la longitud de entrada al canal y en esta misma longitud interponer baffles u obstáculos para así analizar el comportamiento del flujo respecto.

Las dimensiones de la canaleta son las siguientes:

- Ancho del canal: 78 mm
- Ancho de la garganta: 1.37 pulg.
- Alto Canaleta 24 cms
- Alto canal 25 cms
- Caudal diseño entre 39 l/min
- Longitud del Canal 5mts.

3.1.1.1 Toma experimental de datos en Laboratorio.

En la fase inicial del proyecto se realizaron una serie de prácticas con el fin de tomar mediciones de la lámina de agua dentro del canal, con una variación en la distancia.

La primera toma de datos se hizo bajo unas condiciones iniciales, que serían las propuestas para la calibración del modelo, es decir se realizaron mediciones sin ningún tipo de obstáculo. Donde se obtuvo lo siguiente:

- Determinación del caudal de diseño:

El canal de la universidad maneja un caudal máximo de 140 l/min, para el caso de estudio, por efectos prácticos y especialmente para garantizar un buen comportamiento de la lámina de agua, se estableció un caudal de 39 l/ min, que no es más que 0.00065 m³/seg.

Figura 3. Dato Caudal de diseño o entrada



Fuente: propia

Luego de establecer el caudal, se realizó un aforo del mismo, para conocer el tiempo del recorrido del agua dentro del canal, cabe aclarar que este procedimiento es de vital importancia dentro del proceso, puesto que con este dato se puede determinar un tiempo de simulación para el modelo numérico.

Tabla 1. Especificaciones Generales y aforo de Caudal

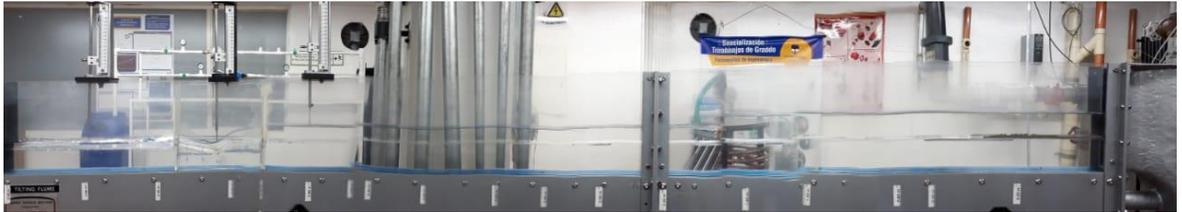
Q de diseño canaleta 39-40 l/s	
AFORO DE CAUDAL	
Litros	s
5	6,598
10	6,903
15	6,845
20	6,57
25	6,57
30	7,052
Total	40,538
Tiempo aforo	6,756

Pendiente canal 0,1%

Fuente: Propia.

Para terminar la toma de datos y las condiciones iniciales ya predeterminadas, se procede hacer la lectura de las láminas de agua haciendo uso de diferentes materiales del laboratorio.

Figura 4. Vista panorámica condiciones iniciales



Fuente: propia.

De la misma manera se desarrollaron varios ensayos más, pero estos con obstáculos ubicados en diferentes distancias dentro del canal.

Adicionalmente, los obstáculos tenían diferentes dimensiones, formas y obstaculizaban el flujo de diferente forma. A continuación, se presentan varias fotografías donde se puede evidenciar el tipo de obstáculo en cada caso.

Figura 5 Obstáculos tipo rectangular.



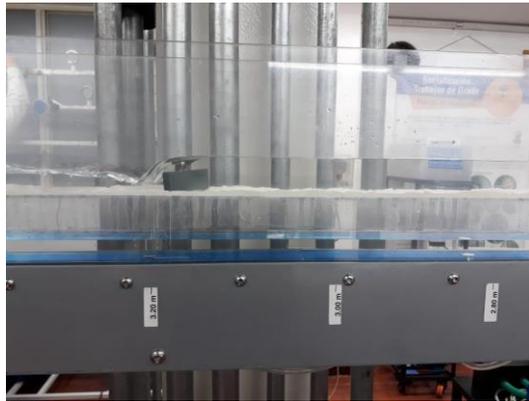
Fuente: propia.

Figura 6. Obstáculos tipo vertedero.



Fuente: propia.

Figura 7. Obstáculos tipo bloque.



Fuente: propia.

Tras la realización de los ensayos se logró establecer que el obstáculo más conveniente por geometría, era el tipo bloque. Además, que este tipo de obstáculo permite un análisis más estable del caso, puesto que hace que las láminas de agua se estabilicen mucho más rápido en comparación con los demás obstáculos, lo que facilita en gran medida la medición del flujo.

Figura 8. Canaleta Parshall. Universidad Católica de Colombia.



Fuente. Propia

Figura 9. Canaleta Parshall y Canal. Universidad Católica de Colombia.



Fuente. Propia

3.2 FASE II: PRE-PROCESSING

3.2.1 Modelación de la canaleta Parshall en OpenFoam

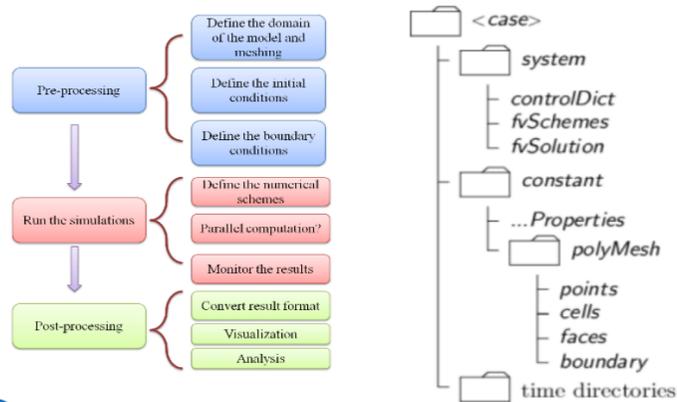
En los últimos años, la Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) se ha convertido en una herramienta útil en el análisis de sistemas de interés práctico, que incluyen fenómenos físicos y químicos involucrados con el movimiento de fluidos; con tales fenómenos se puede transferir masa, cantidad de movimiento, energía y especie química (que puede reaccionar o no) de una región a otra, o de un tiempo inicial a otro tiempo. Este auge se ha debido en parte, a que cada día se tienen equipos de cómputo cada vez más grandes en capacidad (memoria y rapidez) y con menor costo, así como de algoritmos y modelos que pueden representar de manera confiable los fenómenos presentes en el flujo de fluidos del sistema a analizar. Además, de que el análisis con esta herramienta

puede ser más económico que el trabajo experimental, tanto en tiempo como en recursos económicos. Sin embargo, su uso sigue siendo mayoritariamente complementario, ya que, en determinado momento, se tienen que validar las predicciones con datos experimentales o hacer una verificación con datos de correlaciones, ya que no siempre se puede tener mediciones detalladas de parámetros físicos y químicos del sistema.²⁵

Existen tres procesos dentro de la modelación con CFD, que permiten el adecuado proceso constructivo de cualquier modelo. OpenFoam establece que la estructura para el manejo de la información es la siguiente²⁶:

- Pre- Processing:
- Running the code
- Post-Processing.

Figura 10. Esquema estructura de control CFD



Fuente.

<http://www.inh.cl/home/documents/library/Presentaci%C3%B3n%20Open%20Foam%20INH.pdf>

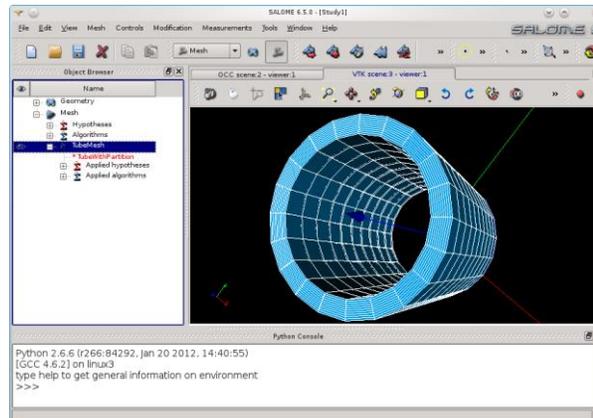
3.2.2. Pre-processing.

²⁵ Rodríguez, W. Salinas, M. Dinámica de fluidos computacional para el análisis de sistemas de interés práctico que incluye el movimiento de fluidos. Enero-febrero 2018. Disponible en <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/Enero-Febrero2018/Paginas/Dinamicadefluidos.aspx>

²⁶ OpenFoam USER GUIDE versión 6. 2018

En esta etapa de la modelación, es posible el diseño constructivo en el software Salome, en este punto del proceso se establecen las dimensiones de las mallas y se calibra el modelo de modo que los resultados en el modelo numérico sean cercanos al modelo físico.

Figura 11. Ejemplo generación de malla para un elemento cilíndrico.



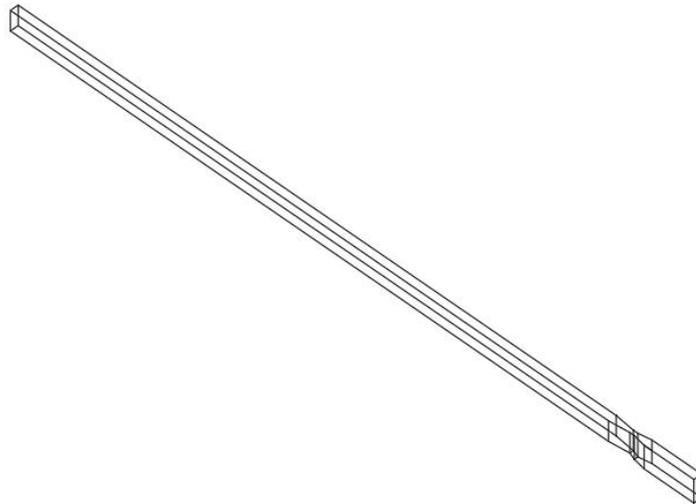
Fuente Software Salome

Para este caso en específico se realizó la etapa de pre-processing de la siguiente manera:

3.2.2.1 Realización geometría Canaleta Parshall.

Para tener una geometría exacta y acertada del caso de estudio se utilizó la herramienta AutoCAD que dentro de sus múltiples funciones, permite exportar sólidos en formato .iges, este es compatible con Salome software que permitió crear caras, muros y demás componente de la geometría.

Figura 12. Geometría en AutoCAD.



Fuente: propia.

3.2.2.2. Generación mallas en Salome.

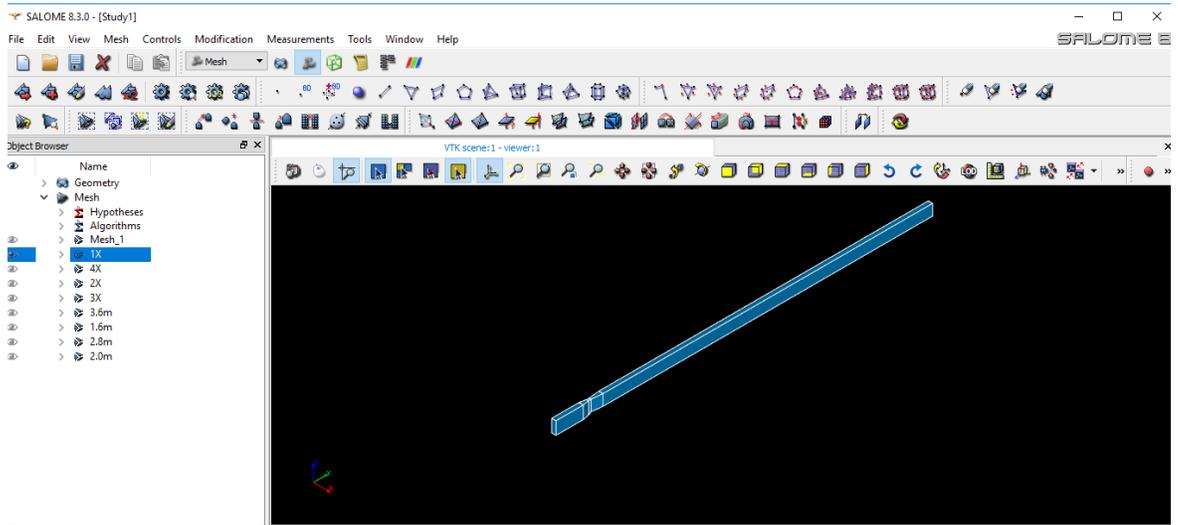
Seleccionar la malla adecuada es algo primordial para el análisis numérico del caso de estudio, de esta depende que se garantice la convergencia y la estabilidad numérica de los elementos finitos lo que hace que se obtengan resultados adecuados.

Para poder determinar la malla más acertada, se realizó un análisis a través del grado de refinamiento en donde se estableció una relación de 1x, 2x, 3x y 4x es decir se asignó una hipótesis para cada enmallado, lo que hizo que cambiara la configuración interna y se obtuviera más elementos al ejecutar cada malla.

Para este caso de estudio en particular, las primeras mallas responsables de la calibración del modelo, se trabajaron bajo condiciones Hexaédricas y haciendo uso del algoritmo Hexahedron, el cual permite generar mallas en elementos de volúmenes regulares en 3D.

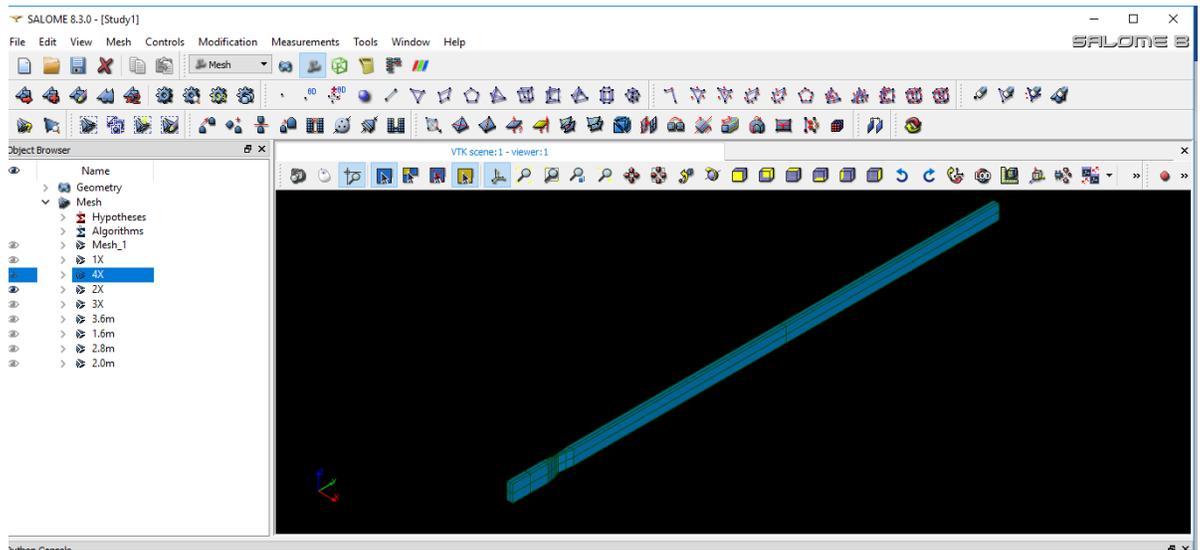
Como se mencionó anteriormente, la selección de la malla es muy importante, por tanto, a continuación, se muestran las mallas generadas para la Canaleta.

Figura 13. Malla 1X



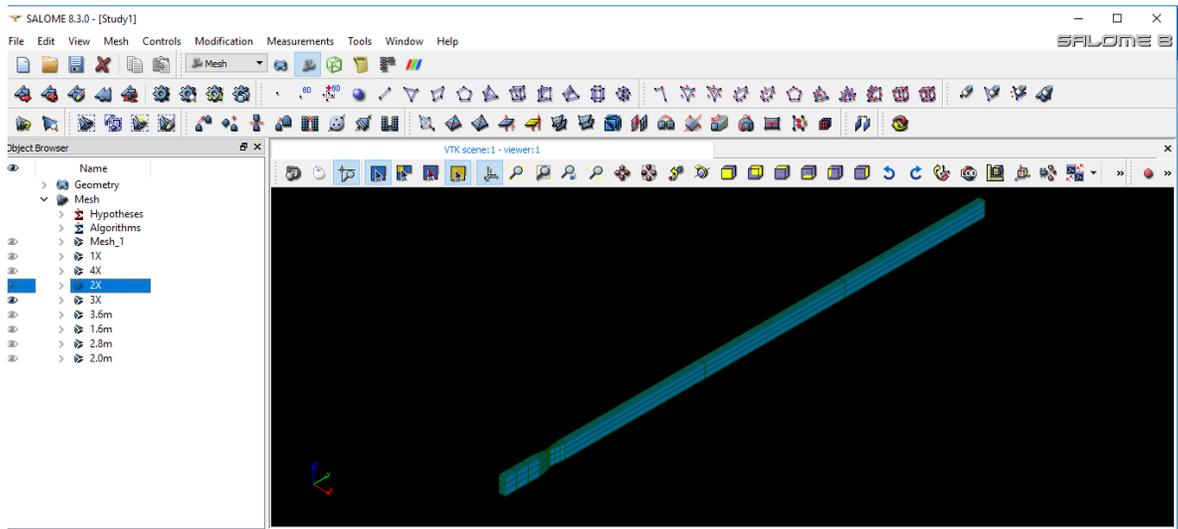
Fuente: propia.

Figura 14. Malla 2X.



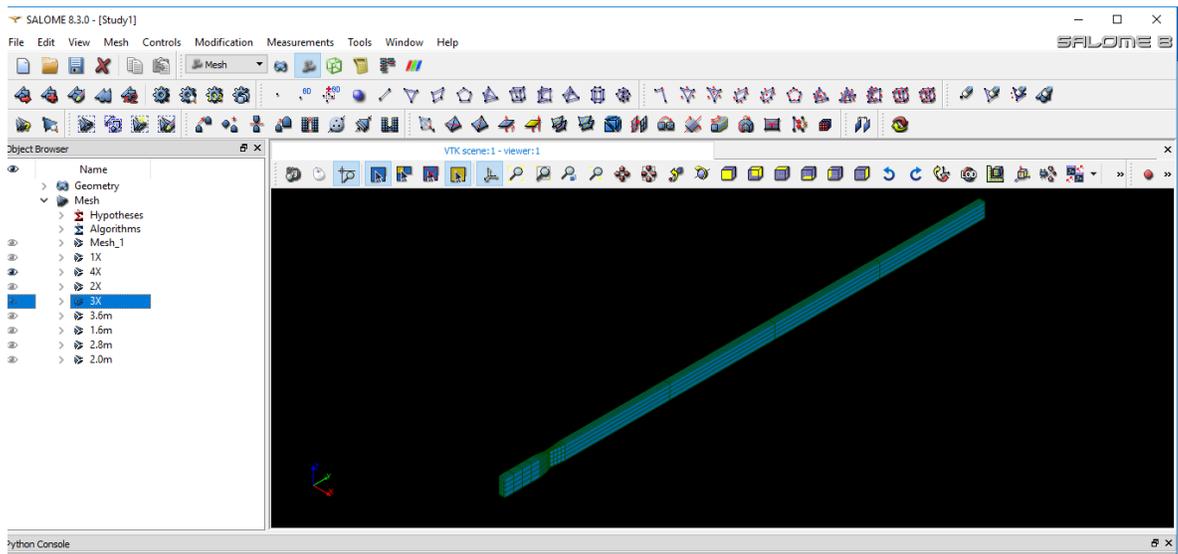
Fuente: propia.

Figura 15. Malla 3X



Fuente: propia.

Figura 16. Malla 4X.



Fuente: propia.

Existen múltiples alternativas de mallado para la construcción de volúmenes sobre los que se realizan simulaciones y se estudian diferentes comportamientos o problemas de flujo, es importante tener en cuenta que, dependiendo de la calidad del mallado, el grosor de la malla y cantidad de elementos, varía el tiempo de procesamiento, los resultados de la simulación y así mismo como se mencionó atrás la estabilidad en el proceso de convergencia de mallado.

3.3 FASE III: RUNNING THE CODE.

Luego de construir la geometría del elemento, se pasa a la codificación de las condiciones que permitirán la simulación del fluido dentro de la canaleta, para eso se usa la herramienta computacional OpenFoam que por medio de una interfaz o una ventana de entrada que aporta Cygwin, permite llamar las librerías (directorios de información propios para cada modelo) que contengan las características a estudiar.

Figura 17 Ventana de entrada OpenFoam.



Fuente: Propia.

En la etapa del running the code se cuentan con tres carpetas dentro del programa, que son de vital importancia:

Figura 18. Carpetas modelo OpenFoam.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
0	25/04/2019 1:17 p....	Carpeta de archivos	
constant	25/04/2019 1:17 p....	Carpeta de archivos	
system	25/04/2019 1:17 p....	Carpeta de archivos	

Fuente. Propia.

Carpeta 0: En esta carpeta se encuentran las variables que maneja el sistema, en este caso presión y velocidad. Aquí dependiendo el modelo se podrán encontrar más variables que son modificables según las necesidades del flujo.

Carpeta constant: aquí se exportan las propiedades de la malla, la información de las caras, los muros y la configuración interna de la misma. También es posible establecer las propiedades del fluido, como gravedad, viscosidad entre otras.

Carpeta system: en esta carpeta se encuentran los directorios relacionados con el control de la simulación, aquí se puede modificar el número de Courant, el Δt y el tiempo de la simulación. En esta carpeta también se encuentran los directorios relacionados con las ecuaciones de solución al modelo, en este caso Gauss Seidel. Esta carpeta es muy importante para mantener la convergencia y estabilidad numérica del modelo.

3.3.1.1 Características del flujo

Tabla 2. Características del flujo, hipótesis del caso

Hipotesis	Explicacion
Flujo Trasciente (Régimen Laminar)	Fluido ordenado, estratificado y suave a lo largo de todo el canal, exceptuando el ancho de la garganta de la Parshall.
Flujo incompresible	El fluido en movimiento no cambia su densidad debido a la aplicación de presión, es decir, no reducen su volumen.
Fluido Newtoniano	Se considera la temperatura constante, la velocidad constante y la densidad constante

Fuente: propia.

Para determinar qué tipo de Solver se acomoda más a las condiciones del flujo estudiado, se establecen unas posibles hipótesis y características que permiten clasificar el fluido para así escoger el solucionador más acertado para el problema asociado.

Tomando como referencia lo descrito en la tabla 7. (características del flujo, hipótesis del caso) se determinó que Solver más adecuado es icoFoam. Para garantizar la elección del flujo, es necesario calcular el número de Reynolds:

$$Q = 0,00063 \frac{m^3}{s}$$

$$y = 0,034 \text{ m}$$

$$b = 0,078 \text{ m}$$

Ecuación 4. Numero de Reynolds.

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

Fuente. Mecánica de fluidos. Robert Mott 6ta edición.

$$\# \text{ Reynolds} = \frac{v \text{ media} * 4Rh}{\vartheta}$$

Donde;

$$v \text{ media} = \frac{0,00063 \text{ m}^3/\text{s}}{0,034 \text{ m} * 0,078\text{m}} = 0,23 \text{ m/s}$$

$$Rh = \frac{0,078 \text{ m} * 0,034\text{m}}{0,078\text{m} + 2(0,034\text{m})} = 0,018 \text{ m}$$

$$\vartheta = 15.10 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \text{ a } 20^\circ \text{ C}$$

Calculo número de Reynolds:

$$\# \text{ Reynolds} = \frac{0,023 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 4(0,018)}{15.10 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 10196.68$$

El número de Reynolds para un flujo transicional esta entre 1000- 3000²⁷.

Por lo que se puede establecer que el modelo del solver se ajusta perfectamente a las condiciones del flujo.

3.3.1.2 Solver icoFoam

El Solver icoFoam se caracteriza por simular fluidos newtonianos; es decir sin cambiar las propiedades al pasar el tiempo (Densidad, Viscosidad); en régimen

²⁷ ZUCARELLI G, DEL VALLE MONSERRI M. Caracterización en canales abiertos. Disponible en <https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/Secciones/Cuadernos/Pdf-991/zucarelli-morresi.pdf>

laminar, usando un algoritmo de acoplamiento presión llamado pisoFoam (OpenFoam, 2015). La conformación de sus ecuaciones se presenta a continuación:

Ecuación 5. Ecuación de la continuidad Incompresible

$$\nabla \cdot u = 0$$

Fuente: (Nilsson, 2015)

En la ecuación 5. Se muestra como el comportamiento del gradiente de la función de velocidad debe ser igual a 0, corroborándose que existe un balance entre la cantidad de flujo de entrada y de salida respectivamente.

Ecuación 6. Ecuación Conservación del Momentum Incompresible

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) - \nabla \cdot (v\nabla u) = -\nabla p$$

Fuente: (Nilsson, 2015)

En la ecuación 6. Se explica el comportamiento de cambio de la velocidad con respecto al tiempo, siendo el factor $\nabla \cdot (uu)$, siendo el factor convectivo de flujo e iterándose valores hasta que $u_0 =$, cumpliendo la condición de transporte lineal en la malla, como se estima que la presión es constante en el sistema, la densidad, la temperatura; los cambios serán cero para dar resultado al gradiente de presiones negativo. El anterior es ampliamente usado para validar el flujo y la convergencia de múltiples mallados en flujo libre (Muñoz, Dulhoste, & Santos, 2007).²⁸

3.3.1.3 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno del mallado tienen una segmentación basada en el proceso de elaboración de la malla. De esta manera se obtiene, Grupo 1: inlet, grupo 2: modelWall, grupo 3: atmosphere, grupo 4: outlet. (se recomienda ver ANEXO 3. SOPORTES SALOME). El sistema en particular es cerrado, con un flujo constante a lo largo de la geometría. De esta manera se puede establecer la siguiente

²⁸ Rojas, L.,(2017). Modelamiento Fenomenológico De Canaleta Parshall Usando Opensource (Openfoam 16.10) Y Simflow 3.1 y Generación De Algoritmo De Generación Automática De geometría Usando Diseño Hidráulico Asistido Por Computador (Cad) Y Python.

configuración para estos grupos: inlet (Patch, una pared que tiene contacto con el fluido), outlet (patch), modelWall (wall) y atmosphere (wall).

3.3.1.4 Condiciones iniciales, estimación de la velocidad de entrada

En la realización de los ensayos de laboratorio se estableció un caudal de 0.00063 m³/s, el cual para el proceso investigativo tomo un valor constante para todos los escenarios, pues a través de la conservación de la masa se determinará que todo el flujo que este entrando a la canaleta, sea el mismo que está saliendo de la misma.

Ecuación 7. Cálculo de caudal.

$$Q = V * A$$

En la ecuación 7 se establece la relación para el cálculo de la caudal, donde tenemos que:

$$Q = 0.00063 \frac{m^3}{s}$$

Área: para el determinar el área del canal se hace lo siguiente,

Ecuación 8. Área canal.

$$A_{canal} = b * h$$

Donde: b: base del canal; h: alto del canal

Realizando la operación correspondiente, se dice que:

$$A_{canal} = 0.078 m * 0.25m = 0.0195m^2$$

De la ecuación 7, se despeja la velocidad, resultando así:

$$V_{entrada} = \frac{Q}{A_{canal}}$$
$$V_{entrada} = \frac{0.00063 \frac{m^3}{s}}{0.0195m^2} = 0.0323 m/s$$

Velocidad de entrada aproximadamente 0.0323 m/s.

3.3.1.5 Condiciones de presión

Para tener un análisis acertado en un problema de flujo libre es importante entender que la presión es una condición muy importante dentro de la configuración numérica, a pesar de ser una variable constante, se evidencia que presenta un efecto directo sobre las demás variables del sistema y las paredes que delimitan el dominio a trabajar.

Por esto se establece una predeterminación en el campo escalar para la simulación del caso de estudio.

Tabla 3. Condiciones de presión.

Grupo	Boundary Conditions	Value
Inlet	ZeroGradient	No contiene valor
modelWall	ZeroGradient	No contiene valor
Atmosphere	ZeroGradient	No contiene valor
Salida	FixedValue	0

Fuente: propia.

Es importante establecer que por ser un sistema cerrado las condiciones de presión varían de punto a punto, por ejemplo, si en el inlet de la estructura se tiene una presión con un valor significativo a la salida este debe ser muy cercano a cero. En teoría es lo que establece la dinámica básica de fluidos la cual define que el comportamiento de los fluidos es ir de un lugar con mayor presión en busca de un lugar de menor presión.

3.3.1.6 Estimación de numero de Courant

El número de Courant es un elemento de control, o indicador de la estabilidad numérica del modelo. Este valor debe estar entre 0.1 y 0.5, revisando la literatura y por experiencia logro determinarse que, si este valor está muy por encima de este rango, el modelo está más expuesto a fracasar en su convergencia.

Este a su vez tiene una relación directa con el tiempo de cálculo (Δt), si Courant está más cerca a uno, menor será el tiempo de cálculo.

El valor de Courant se establece a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Ecuación de Courant-Friedrich-Levy

$$Co = \|U\| \Delta t \Delta x$$

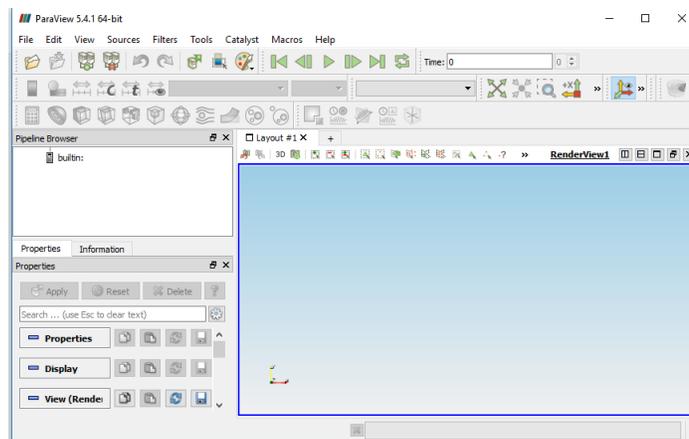
Fuente: OpenFoam Guide User.

(Se recomienda revisar ANEXO 5. CALCULO DE CONTROL SIMULACION HEXA).

3.4 FASE III: POST-PROCESSING.

- Para realizar la lectura de los datos obtenidos a través de la programación establecida, se usa el software ParaView, que permitirá visualizar el comportamiento del flujo dentro de la estructura

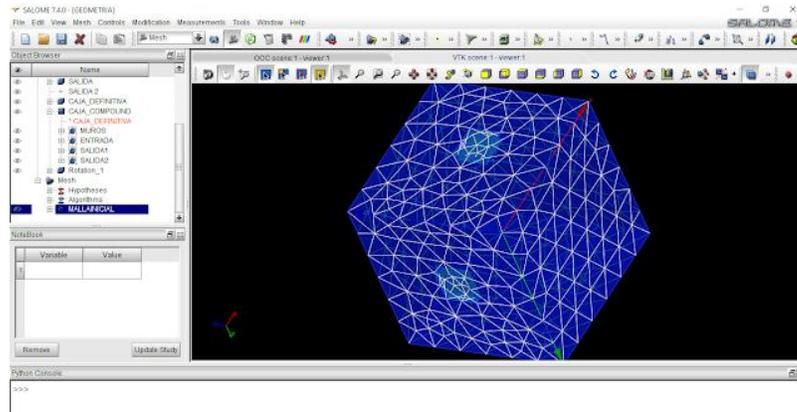
Figura 19. Ventana principal Paraview.



Fuente: Propia.

- Comparación de los resultados obtenidos con el software con los resultados medidos en campo, esto con el fin de construir graficas que permitan determinar el comportamiento del flujo dentro de la canaleta.
- Por último, se realizará un análisis que está relacionado directamente con el refinamiento de la malla seleccionada para la geometría de la estructura, es decir, se analizara el comportamiento del flujo respecto a un tamaño de Hexaedros o triángulos, según sea la configuración más conveniente para el estudio.

Figura 20 .Ventana principal ParaView.



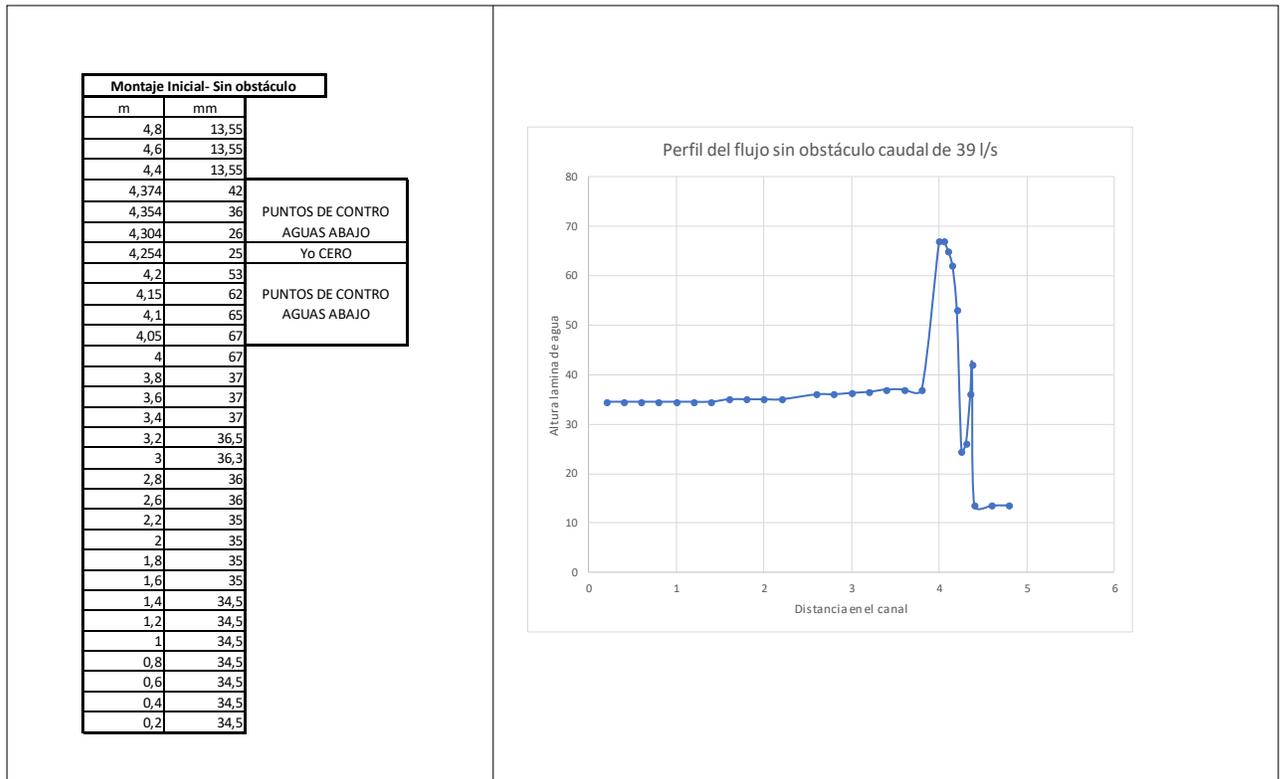
Fuente Rojas L. (2017). Introducción a OpenFoam. 2018, de Semillero de Modelación Ambiental (GRUPO SYRAS) - Universidad Manuela Beltrán (Programa Ingeniería Ambiental) Sitio web: <http://modelacionambientalumb.blogspot.com/2017/01/que-es-openfoam-openfoam-es-un-software.html>

4 RESULTADOS

4.1 Resultados modelo físico

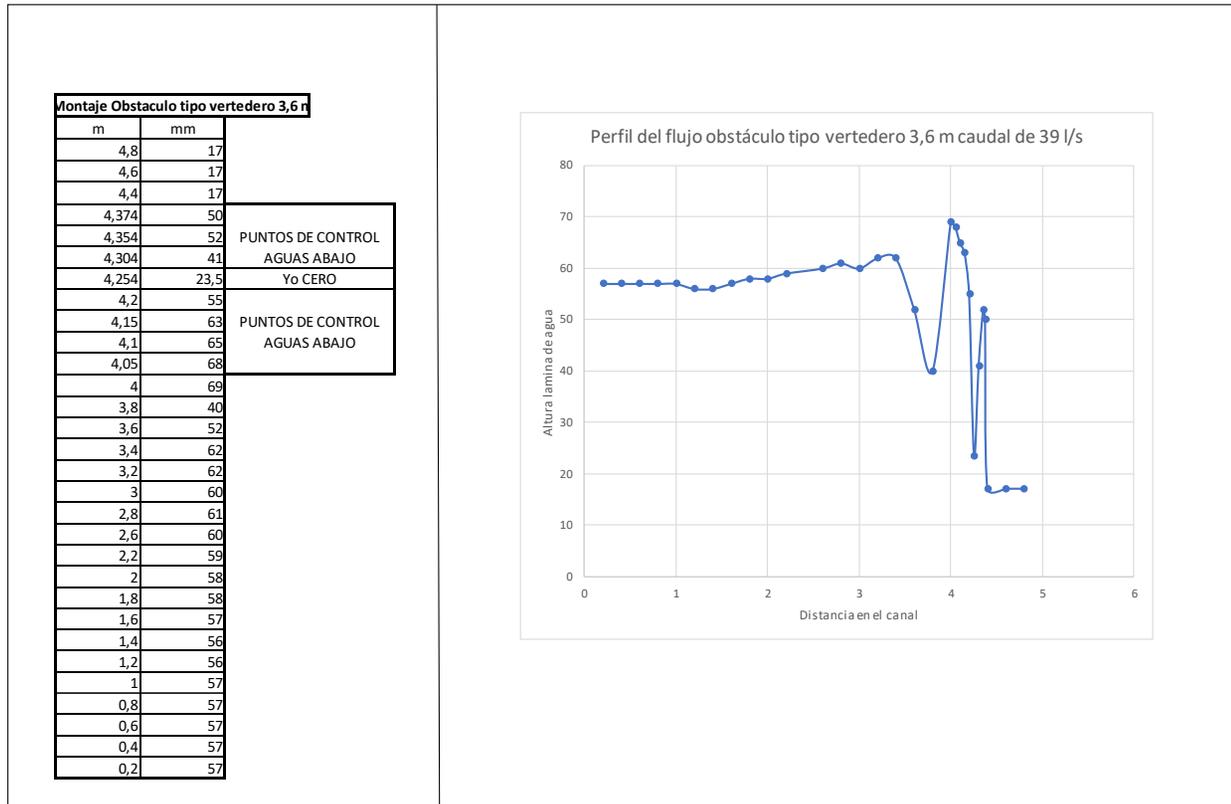
De los ensayos realizados en el laboratorio, se tomaron los siguientes datos

Tabla 4.CASO BASE: sin obstáculos a lo largo del canal



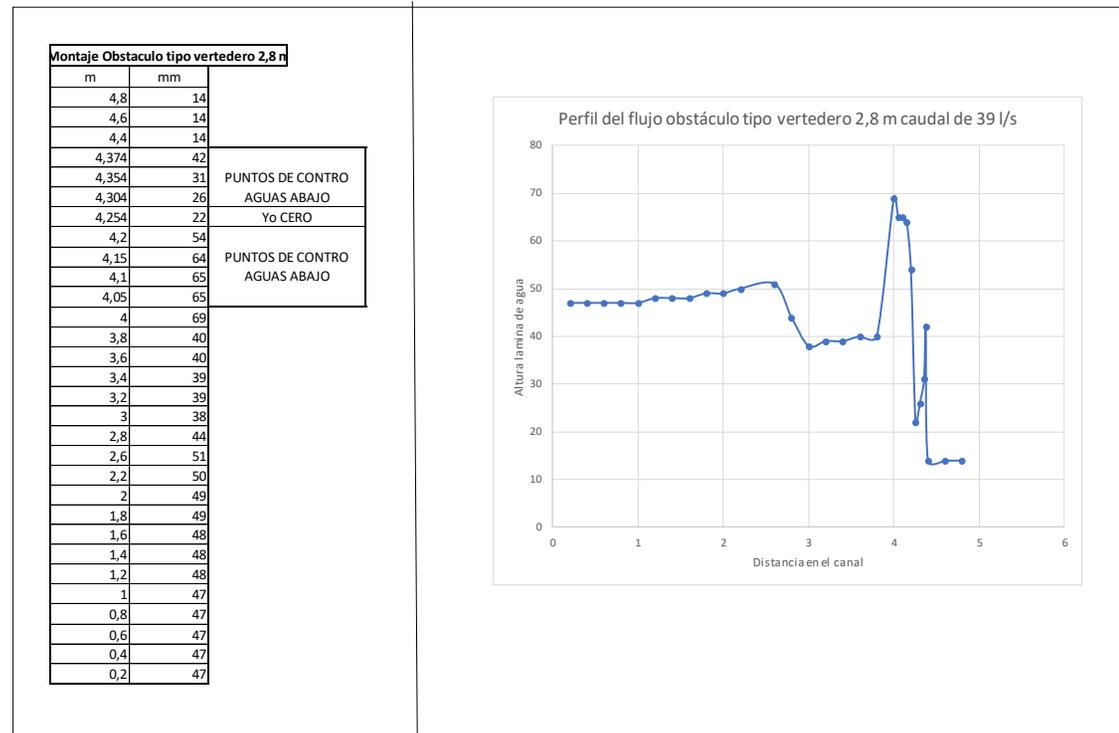
Fuente: Propia.

Tabla 5.CASO 1: Obstáculo a 3.6 m. 10.28 veces ancho de la garganta



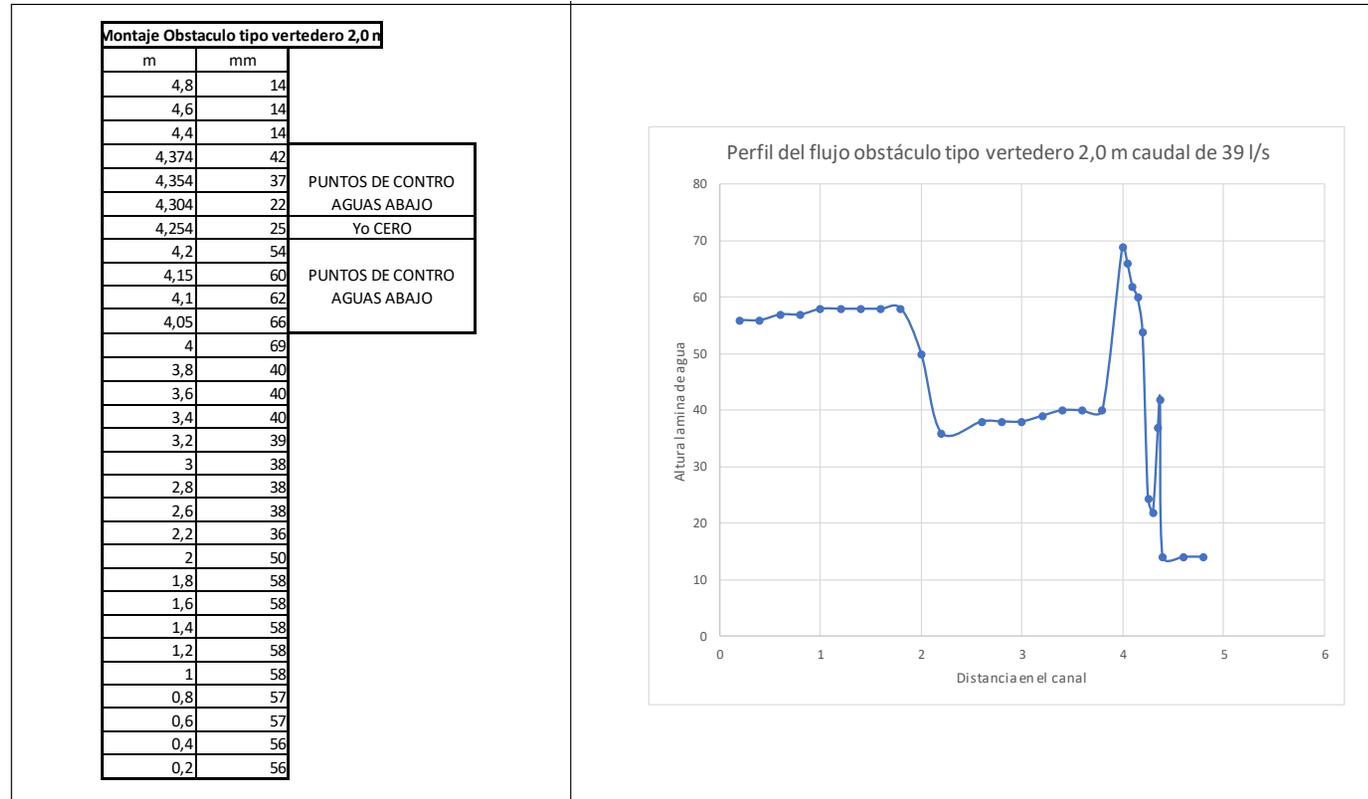
Fuente: Propia.

Tabla 6. CASO 2: Obstáculo 2.8 m. 8 veces ancho de la canaleta



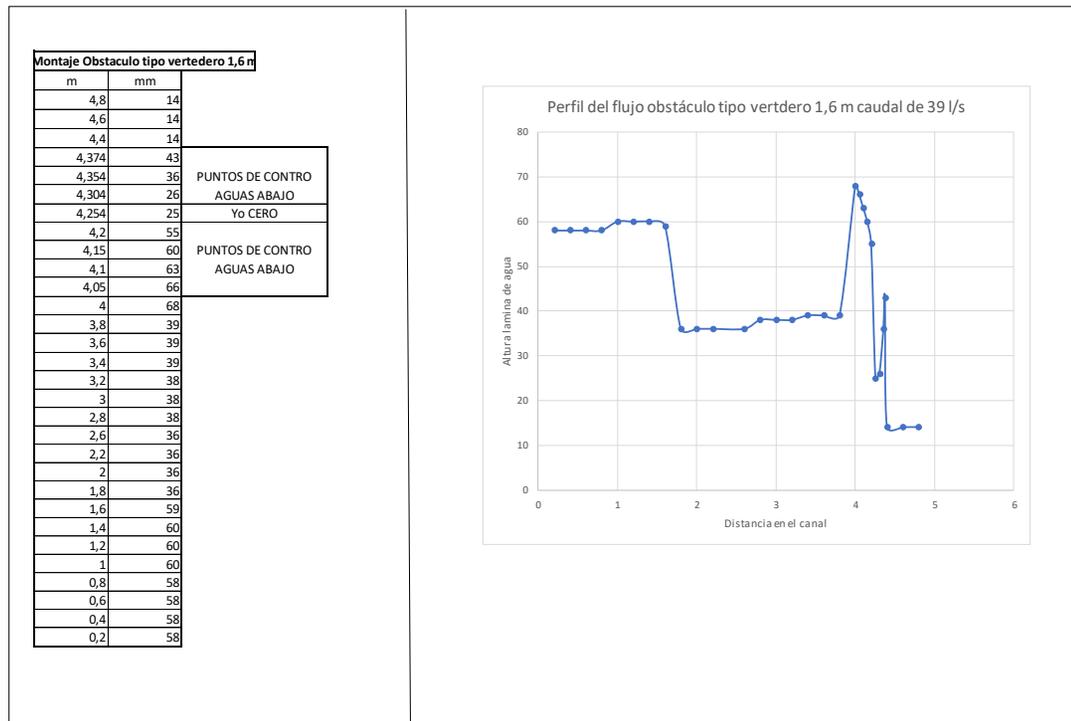
Fuente: Propia.

Tabla 7. CASO 3: OBSTACULO 2 m. 5.71 veces ancho de la garganta.



Fuente: Propia.

Tabla 8. CASO 4: OBSTACULO 1.6 m. 0.45 veces ancho de la garganta



Fuente. Propia.

4.2 Resultados modelo numérico

Tabla 9. Resultados láminas de agua OpenFoam.

LAMINAS DE AGUA A 3,6 M	
ID	m
1	0,059
2	0,059
3	0,056
4	0,056
5	0,059
6	0,050
7	0,042
8	0,056
9	0,061
10	0,067
11	0,070
12	0,070
13	0,023
14	0,059
15	0,042
16	0,050
17	0,026
18	0,026

LAMINAS DE AGUA A 2.8 m	
ID	m
1	0,046
2	0,046
3	0,047
4	0,048
5	0,050
6	0,038
7	0,039
8	0,041
9	0,067
10	0,065
11	0,065
12	0,054
13	0,021
14	0,042
15	0,025
16	0,028
17	0,028
18	0,028

LAMINAS DE AGUA A 2.0 m	
ID	m
1	0,056
2	0,056
3	0,058
4	0,050
5	0,038
6	0,039
7	0,040
8	0,070
9	0,067
10	0,063
11	0,059
12	0,054
13	0,025
14	0,022
15	0,037
16	0,042
17	0,026
18	0,026

LAMINAS DE AGUA A 1.6 m	
ID	m
1	0,056
2	0,056
3	0,059
4	0,036
5	0,036
6	0,037
7	0,038
8	0,067
9	0,065
10	0,063
11	0,059
12	0,054
13	0,025
14	0,056
15	0,040
16	0,026
17	0,026
18	0,026

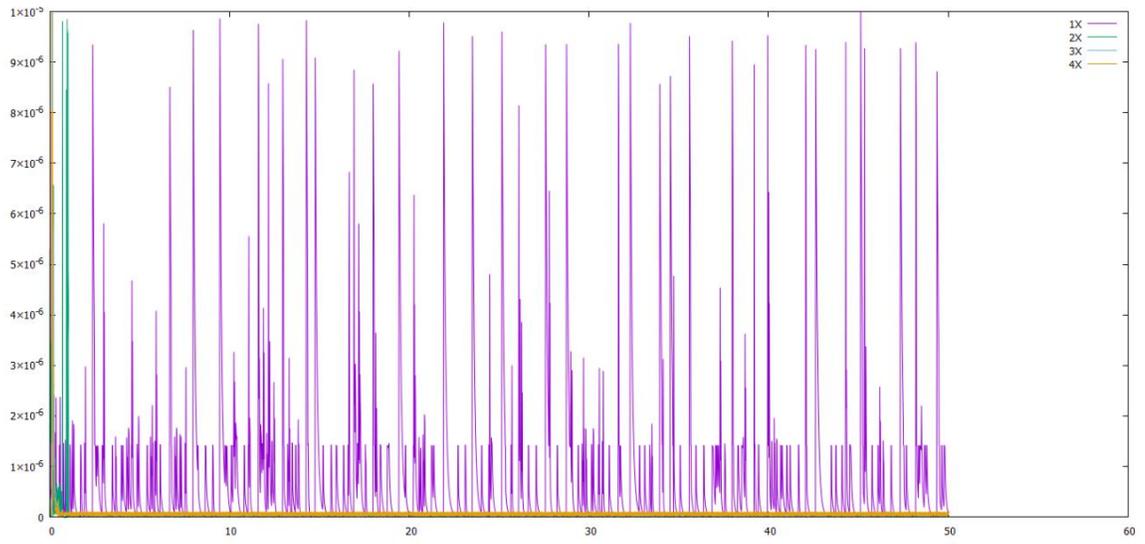
LAMINAS DE AGUA SIN OBSTACULO	
ID	m
1	0,034
2	0,034
3	0,034
4	0,034
5	0,035
6	0,035
7	0,036
8	0,065
9	0,065
10	0,067
11	0,067
12	0,051
13	0,024
14	0,025
15	0,035
16	0,041
17	0,046
18	0,046

4.2.1 Interdependencia de la malla Perfiles residuales.

Luego de establecer las condiciones iniciales y generar las respectivas simulaciones de cada enmallado con un tiempo de simulación de 60 segundos. (ver ANEXO 6. SOPORTES OPENFOAM). Es posible extraer perfiles de residuales y curvas de velocidad. Las primeras graficas indican que tanta estabilidad numérica tiene el modelo, con relación al Courant. Por otro lado, las curvas de velocidad permiten establecer que grado de refinamiento es el más adecuado.

A continuación, se muestra el perfil de residuales para todas las mallas generadas:

Grafica 1. Perfiles residuales para todas las mallas.



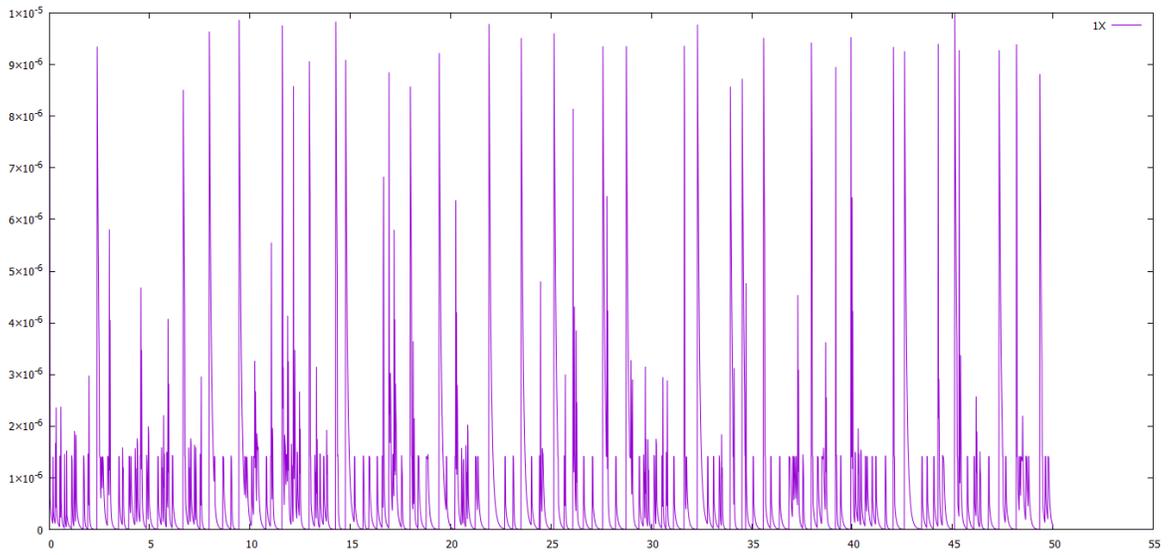
Fuente: propia, generado a través de Gnuplot.

Al obtener esta grafica se puede observar que el comportamiento de las primeras mallas es bastante inestable, lo que muy seguramente en algún punto del proceso generara errores en la simulación o simplemente no arrojará resultados apropiados.

En este punto es importante recordar el número de Courant y su relación con los perfiles residuales, es decir que una malla que presente muchos picos dentro de su perfil residual, es una malla que carece de estabilidad numérica y convergencia.

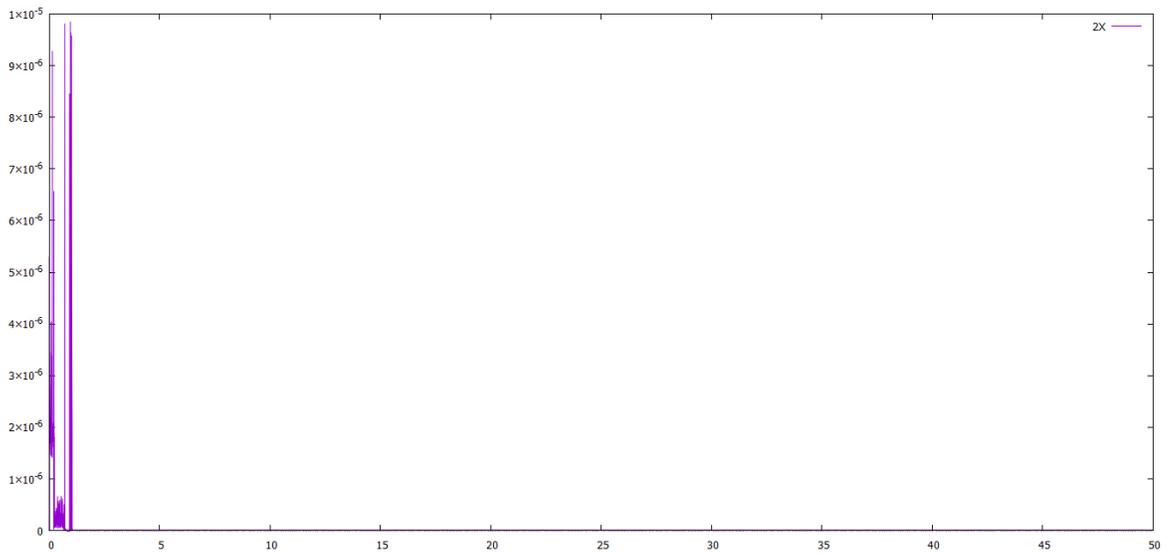
Haciendo un análisis un poco más detallado se logró observar lo siguiente:

Grafica 2. Perfiles residuales para malla 1X.



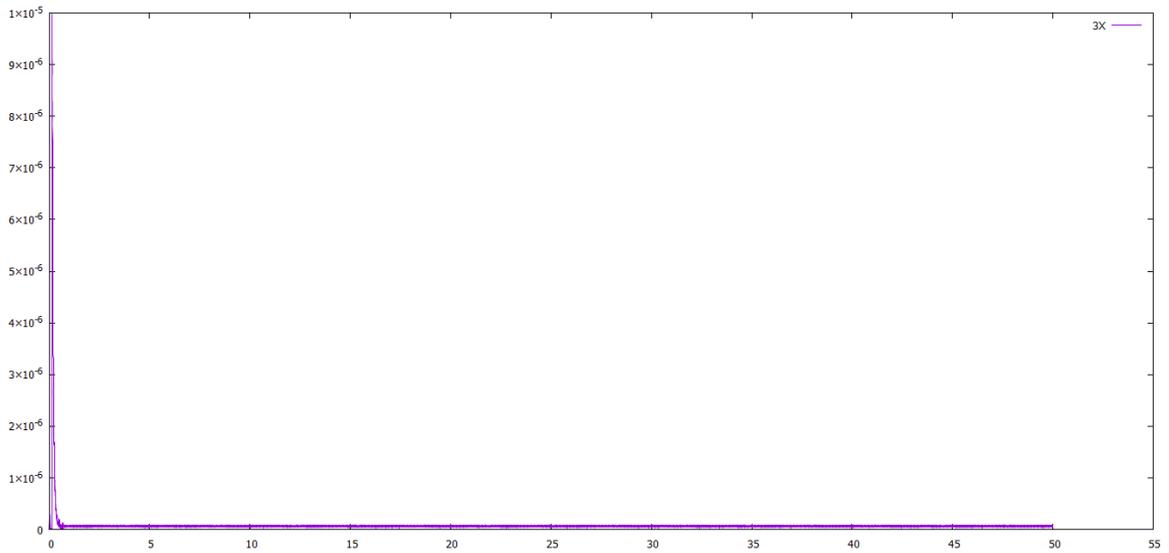
Fuente: propia, generado a través de Gnuplot.

Grafica 3. Perfiles residuales para malla 2X.



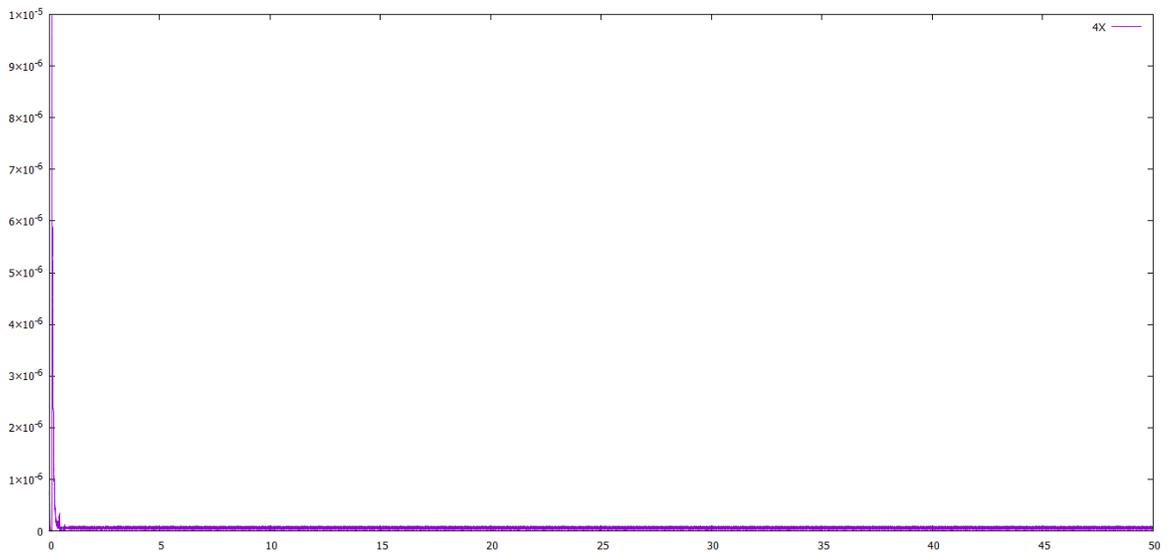
Fuente: propia, generado a través de Gnuplot.

Grafica 4. Perfiles residuales para malla 3X.



Fuente: propia, generado a través de Gnuplot.

Grafica 5. Perfiles residuales para malla 4X.



Fuente: propia, generado a través de Gnuplot.

Tener una vista más preliminar de la de las curvas de residuales, permite determinar que la malla 4X, es la más estable, es una malla que cuenta con una configuración optima. Adicionalmente trabajar con esta malla para las condiciones señaladas hará que el modelo conserve su convergencia a través del tiempo, el Courant para este

caso maneja una escala numérica pequeña, lo que refleja que la simulación contara con un buen tiempo de cálculo y esto finalmente se reduce a que la compilación aportara una buena memoria de información, completa y muy exacta.

4.3 Perfiles de velocidad:

Para lograr la calibración exacta del modelo y asegurar que la todo lo reflejado en las simulaciones, fuera lo más acertado. Se calcularon los perfiles del flujo para cada una de las mallas, de manera que según sus elementos permitía un análisis diferente. Partiendo de comportamientos lineales hasta llevar a un comportamiento parabólico.

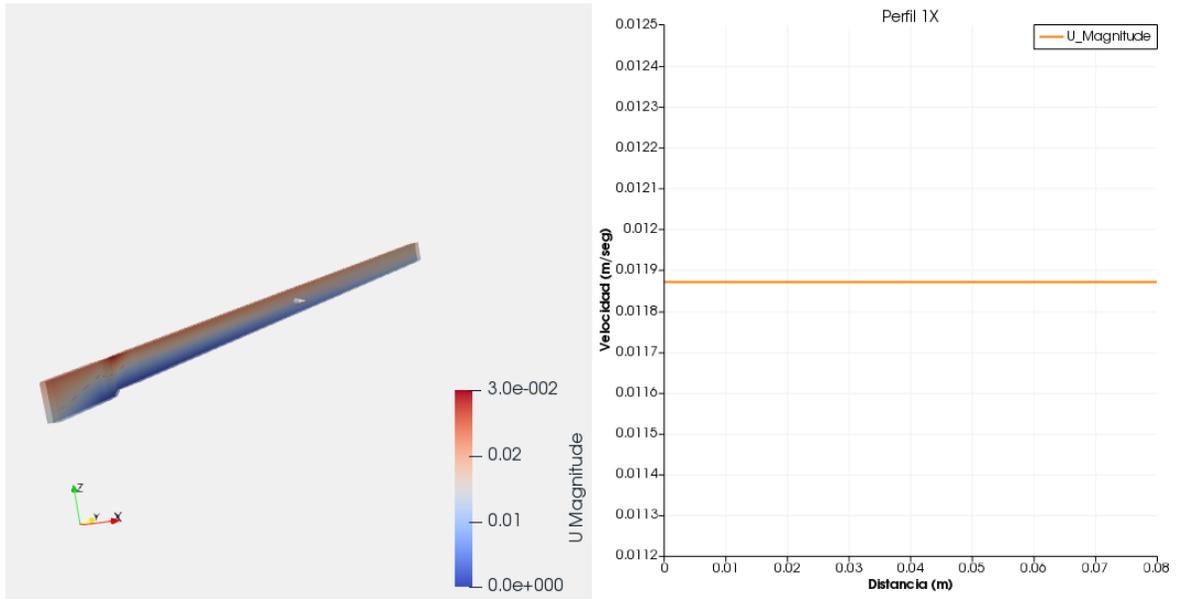
La finalidad de este estudio fue garantizar que la malla utilizada no provocará errores dentro del cómputo, es decir que fuera una malla con un buen número de Courant asegurando estabilidad numérica y mostrando que el comportamiento de la velocidad dentro del enmallado podría evaluarse de manera acertada.

Lo que se encontró después de procesar aproximadamente un paquete de 20 mallas todas con una razón X de refinamiento, fue que la malla 4X cumplía con todas las condiciones requeridas, puesto que esta malla no genero un gran gasto computacional, mostro buenos niveles de convergencia y un perfil parabólico de velocidad acertado.

También se logró establecer que por más que se refiné la malla después de 4X, no se va afectar el nivel de la convergencia, pero si se aumenta el tiempo de cálculo y de la misma manera se incrementa el gasto computacional, por lo que llegado un punto muchas mallas no pudieron ser simuladas, puesto que el ordenador necesitaba una mayor demanda de velocidad y procesamiento.

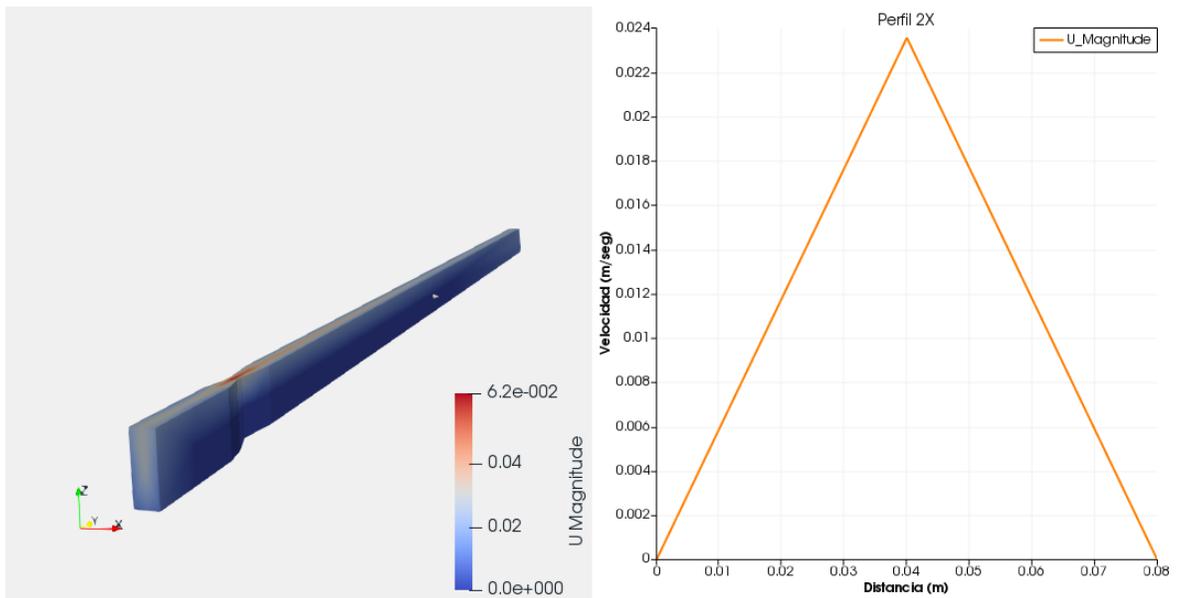
A continuación, se presentan los perfiles de velocidad generados a través de la herramienta ParaView:

Grafica 6. Perfil de velocidad 1X



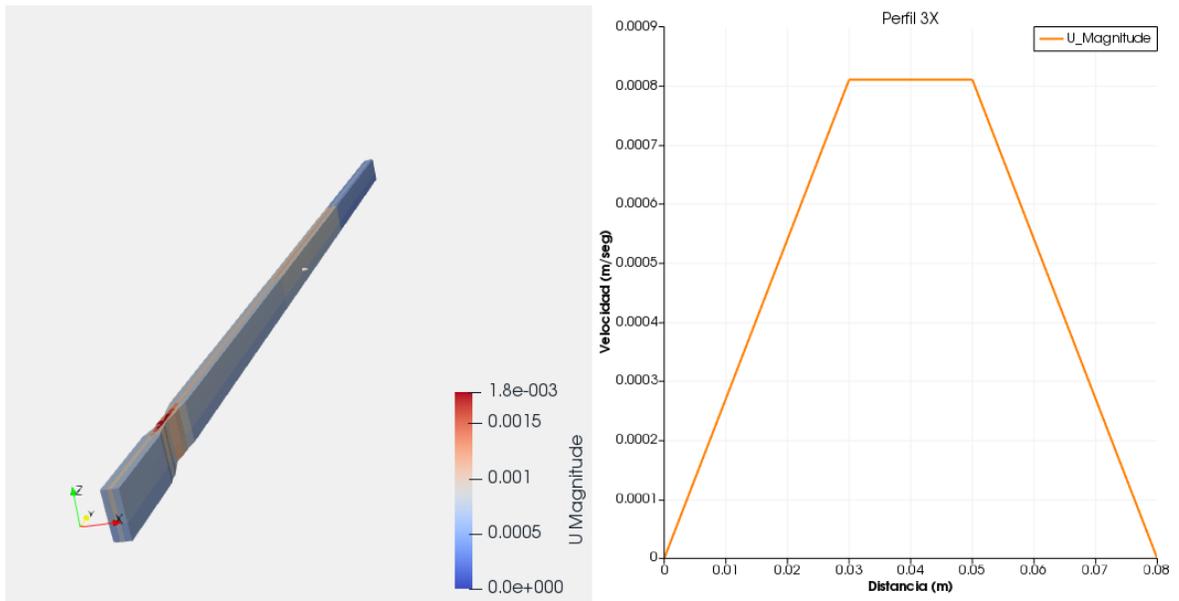
Fuente: propia, generado a través de ParaView.

Grafica 7. Perfil de velocidad 2X



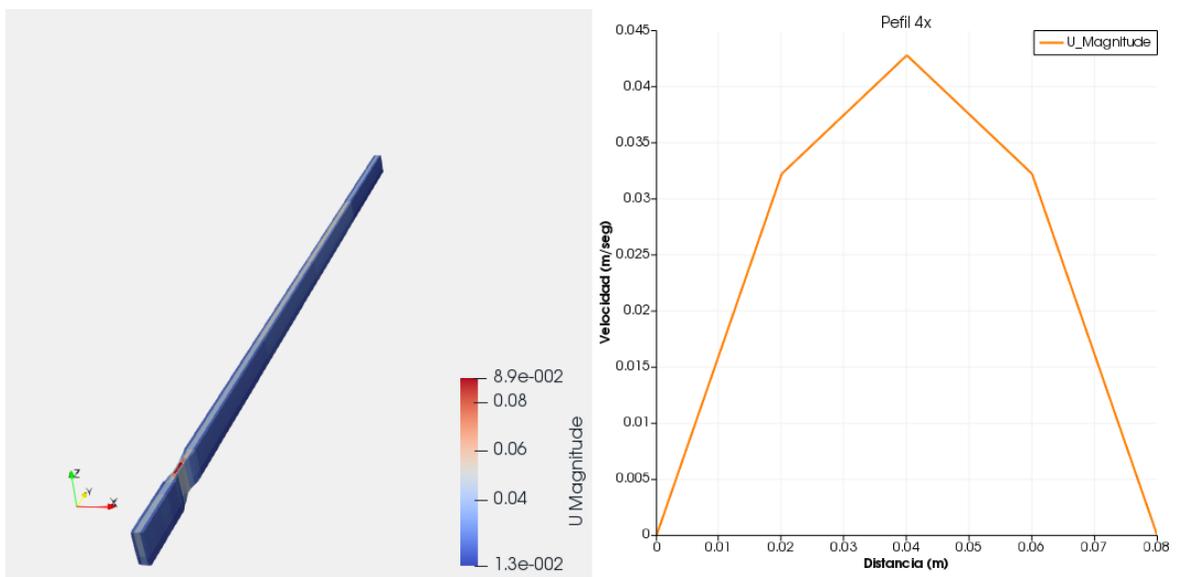
Fuente: propia, generado a través de ParaView

Grafica 8. Perfil de velocidad 3X



Fuente: propia, generado a través de ParaView

Grafica 9. Perfil de velocidad 4X



Fuente: propia, generado a través de ParaView

4.4. Generación de geometría y mallas para obstáculos dentro del canal

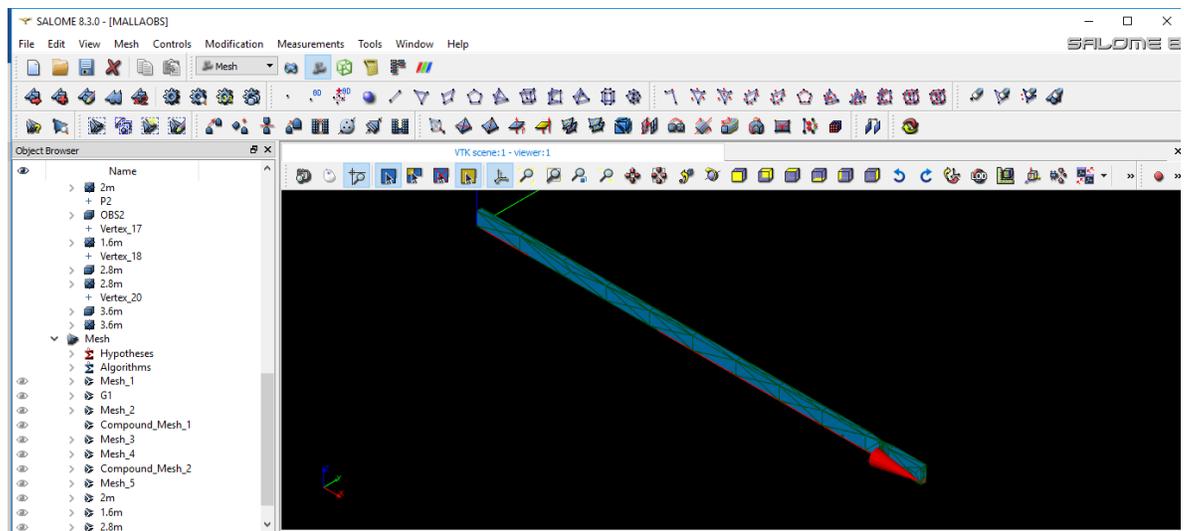
La fase siguiente del estudio, fue simular el obstáculo a diferentes distancias del canal. Pero para esto se debió crear una malla con condiciones específicas, puesto que no se podía manejar las mismas mallas de la calibración. En este proceso se presentaron varios inconvenientes con la selección óptima del enmallado, en este orden de ideas, se optó por realizar la modelación con elementos Tetrahedricos, debido a que los Hedraedros no garantizaban una convergencia del modelo.

La geometría como tal, consistió en la generación de un sólido con una extrusión a una distancia determinada. Esto hacía que el sólido contara con un vacío en su estructura lo que impedía la generación de los elementos de la malla.

La solución a este inconveniente fue generar mallas a partir de elementos con forma de tetraedros, conservando la razón de refinamiento de las mallas de la calibración, esto garantizo la similitud en la modelación, de la misma manera se replanteo el número de Courant para estas simulaciones, seguir trabajando con un numero de estabilidad tan alto generaba complicaciones en la compilación.

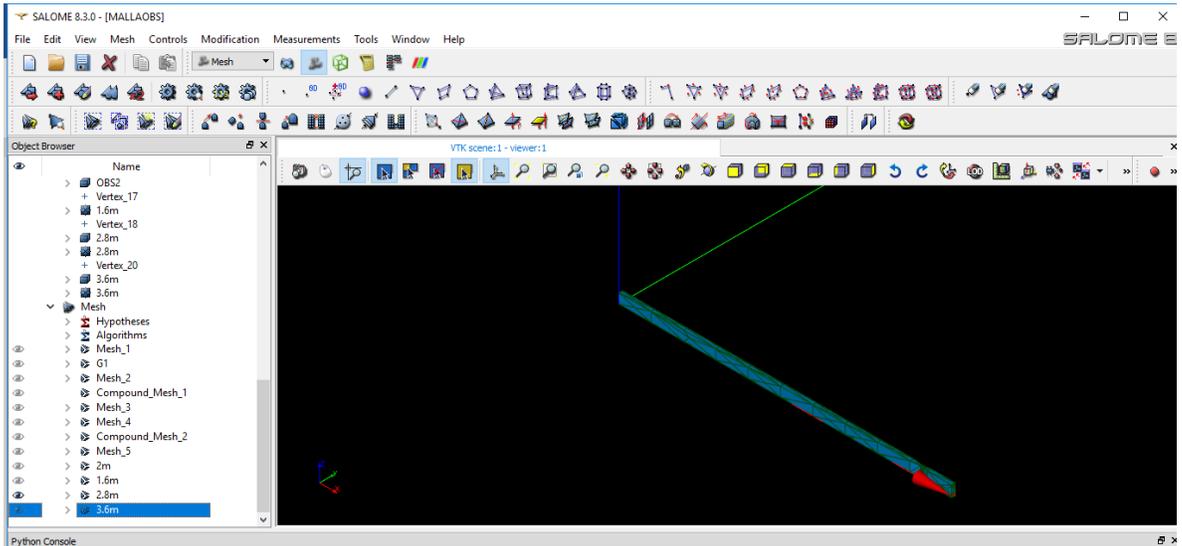
De tal forma que obtuvieron las siguientes mallas:

Figura 21 Malla obstáculo a 3.6 m



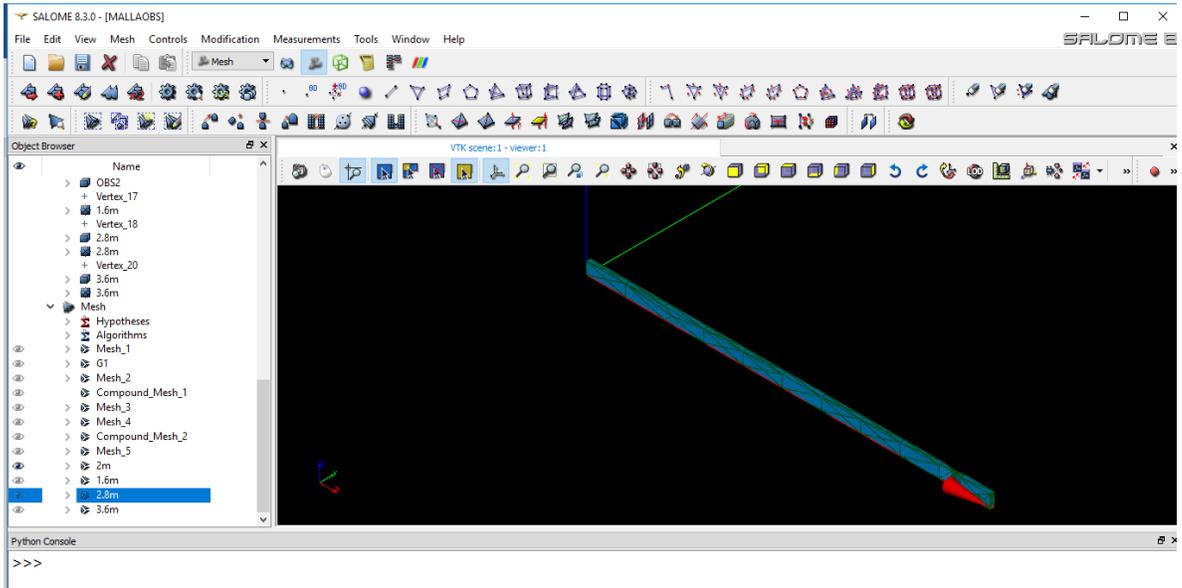
Fuente: propia, generado a través de Salome.

Figura 22. Malla obstáculo a 2.8 m



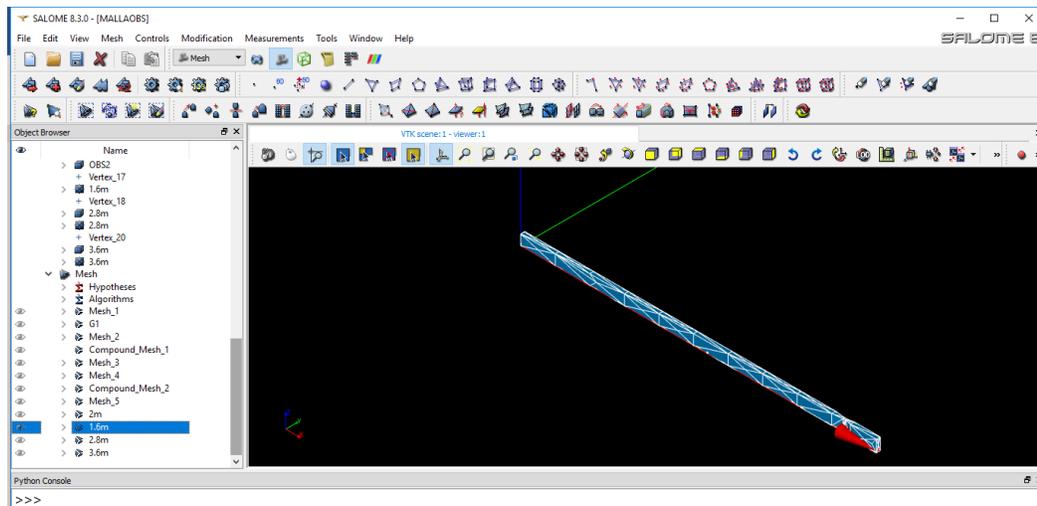
Fuente: propia, generado a través de Salome.

Figura 23. Malla obstáculo a 2.0m



Fuente: propia, generado a través de Salome.

Figura 24. Malla obstáculo a 1.6 m



Fuente: propia, generado a través de Salome.

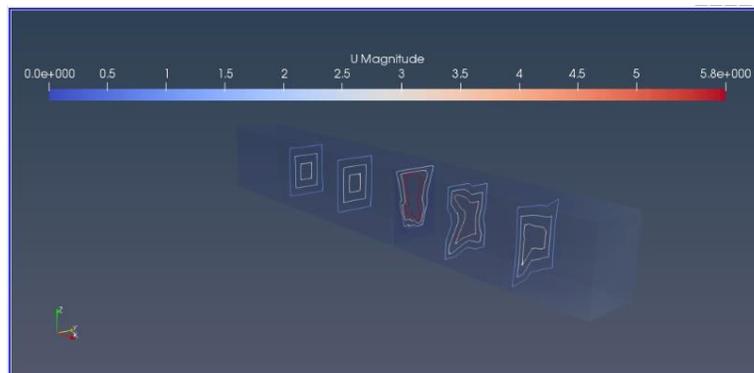
(Se recomienda revisar el ANEXO 3. SOPORTES SALOME, archivo MALLAS OBS, para entender la generación de cada enmallado).

Luego de tener este enmallado se realizó el mismo procedimiento que con las mallas de calibración.

4.5 Comparación resultados modelo numérico y modelo físico.

Para realizar la comparación de datos entre el modelo físico y el modelo numérico, fue necesario crear a partir de la geometría de la canaleta una serie de cortes que permitirían por medio del visor de resultados ParaView evaluar una serie de isolíneas relacionadas con la velocidad en cada punto.

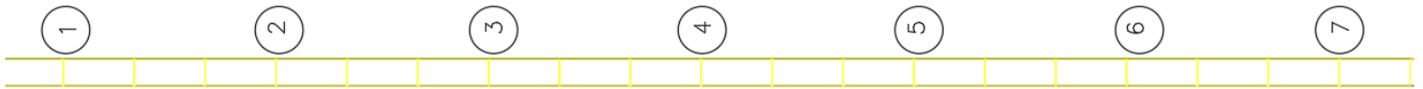
Figura 25. Isolíneas a través del canal.



Fuente. Propia.

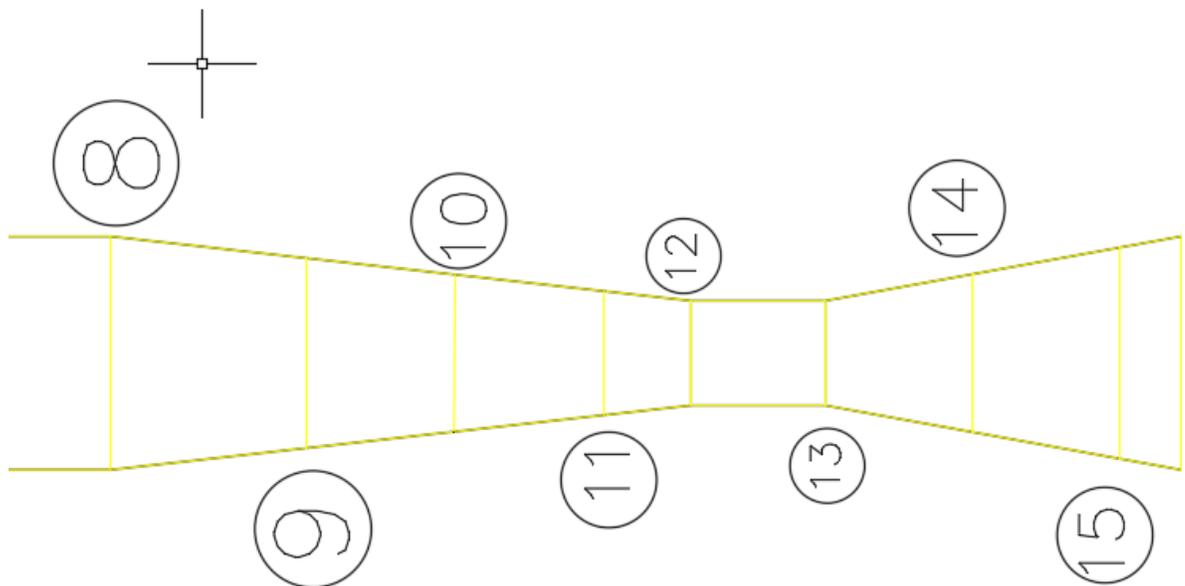
Estos datos de velocidad son las magnitudes en cada corte o punto de coordenada, con estos valores se realizó un promedio para obtener así la velocidad media en cada sección.

Figura 26. Puntos de corte entrada Canaleta Parshall



Fuente: propia.

Figura 27. Puntos de corte garganta canaleta Parshall.



Fuente: propia

Figura 28. Puntos de corte salida canaleta Parshall.



Fuente: propia

Figura 29. Coordenadas puntos de corte.

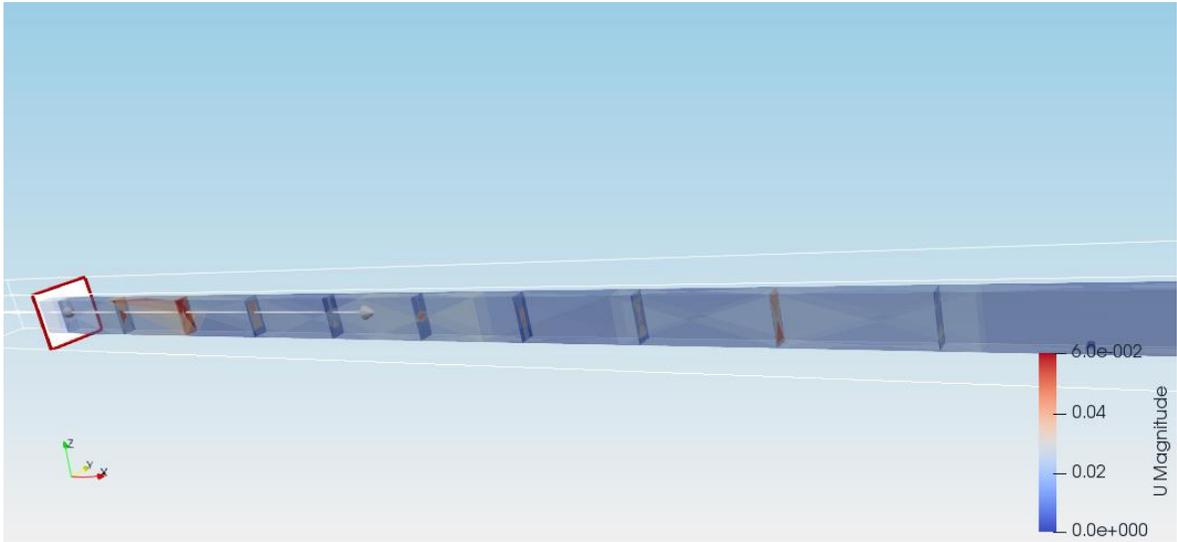
EJE CORTE	LINEA	P1				P2			
		X	X coo.	Y	Z	X	X coo.	Y	Z
X	1	40,881	40,877	45,630	0	40,803	40,799	45,630	0
	2	40,881	40,877	40,030	0	40,803	40,799	40,030	0
	3	40,881	40,877	44,430	0	40,803	40,799	44,430	0
	4	40,881	40,877	43,830	0	40,803	40,799	43,830	0
	5	40,881	40,877	43,230	0	40,803	40,799	43,230	0
	6	40,881	40,877	42,630	0	40,803	40,799	42,630	0
	7	40,881	40,877	42,030	0	40,803	40,799	42,030	0
	8	40,881	40,877	41,830	0	40,803	40,799	41,830	0
	9	40,874	40,871	41,765	0	40,811	40,807	41,765	0
	10	40,868	40,865	41,715	0	40,816	40,813	41,715	0
	11	40,863	40,861	41,666	0	40,821	40,819	41,666	0
	12	40,859	40,857	41,636	0	40,824	40,822	41,636	0
	13	40,859	40,857	41,591	0	40,824	40,822	41,591	0
	14	40,868	40,865	41,542	0	40,815	40,812	41,542	0
	15	40,877	40,874	41,493	0	40,807	40,804	41,493	0
	16	40,881	40,877	41,473	0	40,803	40,799	41,473	0
	17	40,881	40,877	41,373	0	40,803	40,799	41,373	0
	18	40,881	40,877	41,173	0	40,803	40,799	41,173	0

Fuente: propia, dirigirse al ANEXO 7. ANÁLISIS DE DATOS ISOLÍNEAS VELOCIDAD

Teniendo los datos en cada uno de los puntos de corte y acoplados a cada una de la malla se establece la siguiente relación para obtener las láminas de agua a través del canal.

$$\sqrt{\frac{Q \text{ diseño}}{\text{Velocidad media}}} = \text{Altura lamina de agua}$$

Figura 30. Metodología para cortes y toma de datos de OpenFoam a través de ParaView



Fuente: propia.

Figura 31. Resultados cortes OpenFoam.

		Caudal(Q)	0,00063 m ³ /s
Corte	Magnitud Velocidad (Vs)		
1	0,1	m/s	
0,2 m en canal	0,25	m/s	
	0,4	m/s	
	0,05	m/s	
	0,1	m/s	
Velocidad Promedio	0,180 m/s		
Altura obtenida	0,059 m		
Corte	Magnitud Velocidad (Vs)		
2	0,1	m/s	
0,80 m en canal	0,25	m/s	
	0,4	m/s	
	0,05	m/s	
	0,1	m/s	
Velocidad Promedio	0,180 m/s		
Altura obtenida	0,059 m		

Fuente: propia.

Ver ANEXO 7. ANÁLISIS DE DATOS ISOLÍNEAS VELOCIDAD para conocer a detalle los resultados

Dentro del análisis de los resultados obtenidos se pudo establecer que los datos del modelo numérico tienen una diferencia de 1.5 mm respecto a los resultados de OpenFoam.

Por lo que se puede establecer una relación de error para conocer la exactitud del modelo:

$$\frac{Dato\ exp - Dato\ openFoam}{Dato\ exp} * 100$$

Se hizo el cálculo para Y_0 en 2 m que es cuando la distancia del obstáculo no interfiere entre las mediciones del aforo de caudal

$$\frac{24,5 - 24}{24,5} * 100 = 2\%$$

Lo que ratifica que el modelo es muy preciso dentro de su configuración.

A continuación, se muestra la comparación de resultados obtenidos por el modelo numérico y los tomados en el laboratorio a través del modelo físico

Tabla 10. Comparativo Datos modelo numérico- datos modelo físico.

Resultados 3,6m			Resultados 2,8 m			Resultados 2,0 m			Resultados 1,6 m			Resultados sin obstaculo		
Corte	OpenFoam	Modelo físico	Corte	OpenFoam	Modelo físico	Corte	OpenFoam	Modelo físico	Corte	OpenFoam	Modelo físico	Corte	OpenFoam	Modelo físico
ID	m	m	ID	m	m	ID	m	m	ID	m	m	ID	m	m
1	0,059	0,057	1	0,046	0,047	1	0,056	0,053	1	0,056	0,058	1	0,034	0,035
2	0,059	0,057	2	0,046	0,047	2	0,056	0,053	2	0,056	0,058	2	0,034	0,035
3	0,056	0,056	3	0,047	0,048	3	0,058	0,054	3	0,059	0,060	3	0,034	0,035
4	0,056	0,058	4	0,048	0,049	4	0,050	0,055	4	0,036	0,036	4	0,034	0,035
5	0,059	0,060	5	0,050	0,051	5	0,038	0,036	5	0,036	0,036	5	0,035	0,036
6	0,050	0,062	6	0,038	0,039	6	0,039	0,040	6	0,037	0,036	6	0,035	0,037
7	0,042	0,040	7	0,039	0,040	7	0,040	0,040	7	0,038	0,038	7	0,036	0,037
8	0,056	0,068	8	0,041	0,069	8	0,070	0,040	8	0,067	0,068	8	0,065	0,067
9	0,061	0,068	9	0,067	0,065	9	0,067	0,066	9	0,065	0,066	9	0,065	0,067
10	0,067	0,065	10	0,065	0,065	10	0,063	0,062	10	0,063	0,063	10	0,067	0,065
11	0,070	0,063	11	0,065	0,064	11	0,059	0,060	11	0,059	0,060	11	0,067	0,062
12	0,070	0,055	12	0,054	0,054	12	0,054	0,054	12	0,054	0,055	12	0,051	0,053
13	0,023	0,024	13	0,021	0,022	13	0,025	0,025	13	0,025	0,025	13	0,024	0,026
14	0,059	0,041	14	0,042	0,042	14	0,022	0,022	14	0,056	0,022	14	0,025	0,022
15	0,042	0,052	15	0,025	0,031	15	0,037	0,037	15	0,040	0,043	15	0,035	0,036
16	0,050	0,050	16	0,028	0,026	16	0,042	0,042	16	0,026	0,026	16	0,041	0,042
17	0,026	0,017	17	0,028	0,014	17	0,026	0,014	17	0,026	0,014	17	0,046	0,014
18	0,026	0,017	18	0,028	0,014	18	0,026	0,014	18	0,026	0,014	18	0,046	0,014

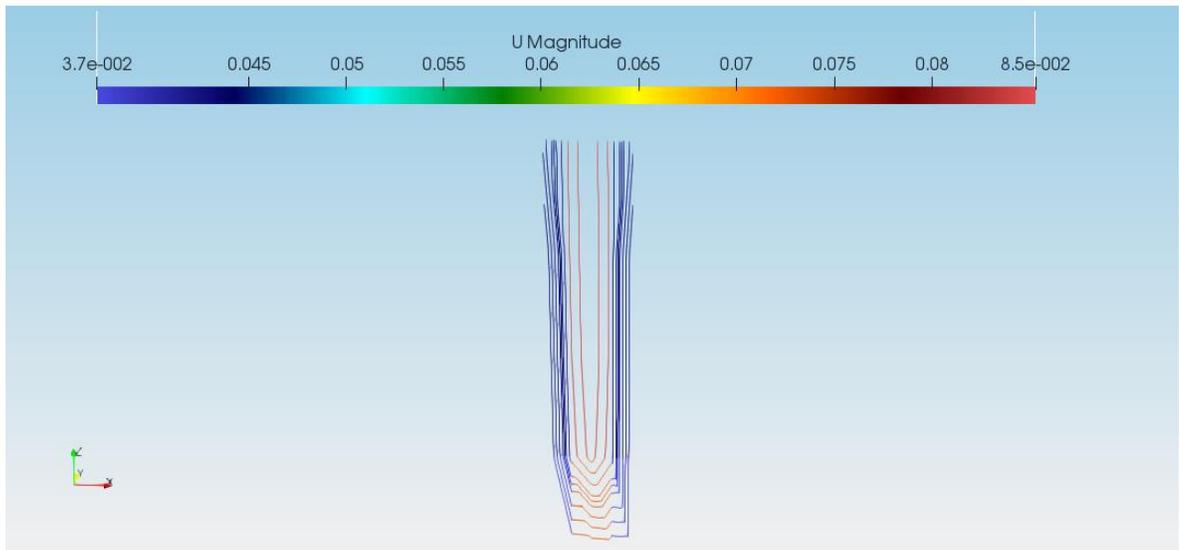
Fuente: Propia.

4.6 Comparación de los perfiles de velocidad del flujo

Además de los análisis anteriores, se estudió el comportamiento de perfil de velocidad en el canal.

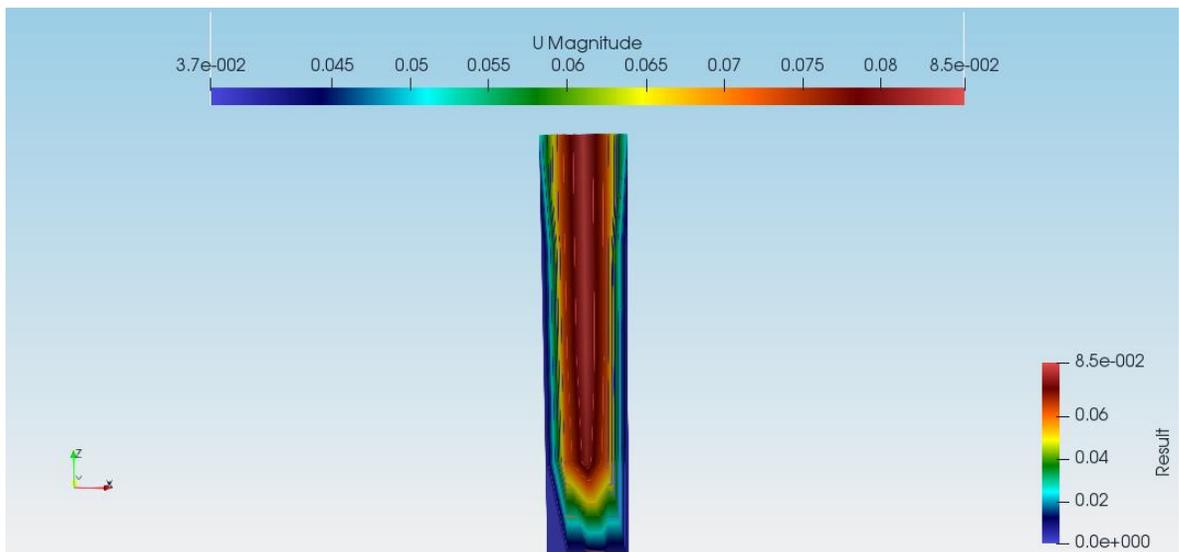
Para este caso se realizó un corte en la estructura, obteniendo lo siguiente:

Figura 32. Perfil de velocidad dentro del canal



Fuente: Propia.

Figura 33. Perfil de velocidad contorno.



Fuente: Propia.

Los resultados anteriores están netamente relacionados con la geometría del canal, para este caso como es un canal rectangular la distribución de la velocidad será mucho mayor en el centro de la sección, esta teoría puede ser fácilmente comparada con lo propuesto por Arturo Rocha en su libro Hidráulica de canales:

Figura 34. Distribución de la velocidad en diferentes canales

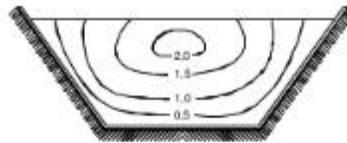
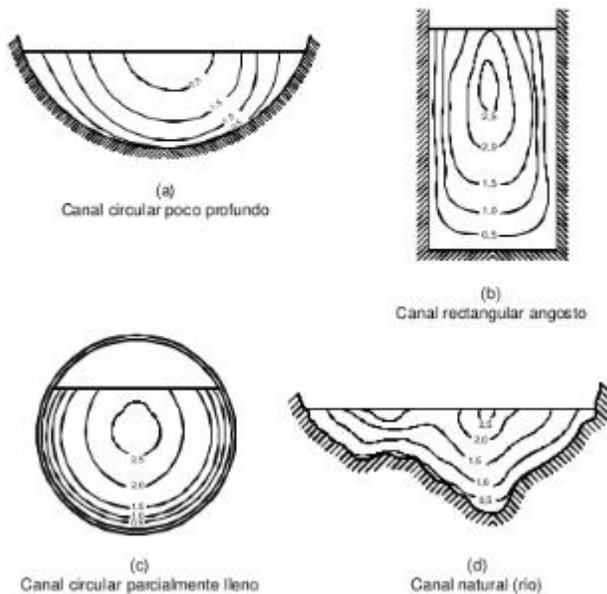


Figura 1.14 Isotacas en un canal de sección trapecial



Fuente. ROCHA Arturo. Hidráulica de tuberías y canales. Figura 1.9 Distribución de velocidades en un canal.

5. CONCLUSIONES

- Generar mallas estructuradas con elementos hexaédricos, resulta mucho más práctico y garantiza altamente la estabilidad del modelo. Para este paso en particular manejar un refinamiento de 4X resulta bastante óptimo como se evidencio en los perfiles de velocidad y residuales.
- El número de Courant es un valor demasiado importante para lograr que la simulación tenga éxito, pues de este depende la estabilidad y la convergencia número del modelo, de la misma manera se evidencia una relación directa con el tiempo de cálculo.
- Partiendo de los resultados obtenidos en el laboratorio y los resultados de OpenFoam, se logra determinar que la longitud mínima de aproximación a la canaleta es de 2 m, es decir, 5.7 veces el ancho de la garganta. Después de esta distancia no se generará afectación alguna en la toma de mediciones dentro de la canaleta.
- Crear enmallado para elementos solidos con extrusiones dentro de su composición, resulta difícil si no existe una continuidad en los nodos de la estructura. Para este caso en especial es mucho más práctico y efectivo para el modelo, generar mallas con elementos tetraédricos que a su vez tengo un Courant de valor bajo, para evitar problemas de convergencia.
- El refinamiento de las mallas dentro de la configuración del modelo, es una configuración vital dentro del mismo, si se tiene mallas con grandes refinamientos, los tiempos de procesamiento aumentaran en gran medida y puede que los diferentes ordenadores tengan un gasto computacional demasiado alto, por lo que resulte imposible procesar este tipo de mallas.
- La exactitud del modelo es del 1.96% lo que significa que es un modelo bastante preciso para las diferentes condiciones requeridas, de la misma manera se establece que el modelo trabaja bajo diferentes tipos de enmallado siempre y cuando se mantengan una razón de refinamiento razonable.
- El modelo puede ser implementado en diferentes estudios que se asemejen a las condiciones iniciales del modelo, teniendo en cuenta que hay ciertas variables constantes como la velocidad y el área.

6. RECOMENDACIONES

- Establecer razones de refinamiento pequeñas e ir las aumentando poco a poco resulta bastante útil para conseguir mallas apropiadas.
- Los tiempos de simulación no deben ser demasiado exagerados, esto hará que dentro de la compilación se genere exceso de información, saturando el procesamiento.
- Para garantizar la estabilidad numérica y convergencia del modelo, es importante controlar el número de Courant.
- Es posible combinar mallas de composiciones diferentes, es decir con elementos triangulares y hexaedros a su vez.
- Es posible dar continuidad al proyecto, evaluando el modelo a través de otros solucionadores, que permitan incluir modelos de turbulencia.
- Se da como opción estudiar el comportamiento de la forma, altura y manera de obstruir el flujo de los obstáculos interpuestos. Es decir, es posible evaluar como la variación de estos en cuanto a sus condiciones geométricas afectan el flujo.

7. ANEXOS

7.1 ANEXO 0. ANTEPROYECTO Y RUBRICA APROBADA

7.2 ANEXO 1. ENSAYOS LAB TESIS

7.3 ANEXO 2. SOPORTES AUTOCAD

7.4 ANEXO 3. SOPORTES SALOME

7.5 ANEXO 4. CONTROL TETRA

7.6 ANEXO 5. CALCULOS DE CONTROL SIMULACION HEXA

7.7 ANEXO 6. SOPORTES OPENFOAM

7.8 ANEXO 7. ANALISIS DE DATOS ISOLINEAS

7.9 ANEXO 8. SOPORTES GNUPLOT

7.10 ANEXO 9. FOTOGRAFIAS

8. BIBLIOGRAFIA

1. AISENBREY Jr, HAYES R, WARREN H, Winsett D, Young R. (1978). Design of small canal structures . Denver, Colorado, pag 245
2. ASTM. *Standard D 1941-9. 2001 Standard Test Method for Open Channel Flow Measurement of Water with Parshall Flume*. New York: American National Standard.
3. AUBIN J., FLETCHER D. F., y XUEREB C. (2004). Modeling turbulent flow in stirred tanks with CFD: the influence of the modeling approach, turbulence model and numerical scheme. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28(5), 431-445
4. AYALA A., AYALA R., GALLEGOS M. y URIBE R. (2015). Optimal location of axial impellers in a stirred tank applying evolutionary programming and CFD. *Chemical engineering research and design* 100 203–211.
5. BAYLAR, A., AYDIN, M., UNSAL,M., y OZKAN, F.,(2009). Numerical Modeling of Venturi Flows for Determining air Injection Rates using Fluent V6.2, *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 14, No. 2, 97-108.
6. BUREAU OF RECLAMATION: Managing Water in the West. (1997). USBR Water Measurement, Chapter 8. Section 10. Parshall Flumes, de Chapter 8- FLUMES Sitio web: https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/chap08_10.html
7. BOS, M., REPLOGE, J., CLEMMENS, A.,(1986). Aforadores de caudal para canales abiertos, *International Institute for Land Reclamation and Improvement*, pag 15.
8. BRUCE, B., (N.A). The importance of accurate open channel flow measurement. N.A, N.A, 679-681. N.A, De N.A.
9. CIMBALA, J. M., & CENGEI, Y. a. (2001). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. *McGrawHill, Primera Ed*, 10–11.
10. DAMASCENO F, DA COSTA F, ARÊDES M, OSORIO J, De Fátima I. (2011). Computational Fluid Dynamics (Cfd) And It'S Use For Analysis Of Gas Distribution Inside Animal Production Facilities: A Literature Review. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica Print version ISSN 0123-4226*, 14, 88. 2018, De Scielo Base de datos.

11. Formulación por Elementos Finitos. Sitio web: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70238/fichero/Capitulo+5.pdf>
12. Foundation, O. (2014). OpenFOAM - The Open Source CFD Toolbox - User Guide. *User Guide*, 222.
13. FRIDOLIN, K. (2012). CFD for air induction systems with OpenFOAM. Thesis, 1–59.
14. GARCÍA, F. (2009). Generación De Mallas No Estructuradas Para La Implementacion De Modelos Numéricos, 157, 17–25.
15. GUERRERO J. (2013). Introductory OpenFOAM Course. *University of Genoa, DICCA*
16. HERNANDEZ G. (N.A). EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS. 2018, de N.A Sitio web: http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/hidrogeologia/NotasCurso/1-MDF1_1-10.pdf
17. International institute for land reclamation and improvement, ILIRI, wageningen delf hydraulic laboratory, DELFT, Agricultural university, Departments of hydraulics and irrigation Wageningen. (1975). N.A . Discharge measurement structures , N.A, 38.
18. Introducción al método del elemento finito. Sitio web: <http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/mecsol/Tema7.pdf>
19. JUNHONG, W. (2004). Open Source CFD Solver - OpenFOAM. Lecture, 1–5.
20. LEY T, STROUD R, TYNER B, VENEMAN S, THRUSH G, BRUNER C, MEYER D, BOUGHTON B, CUNNING L, TYLER P, WILD M, EROSKY B, RIDNOUR D, ARNETT T, RUSCH M, GUTIERREZ A, HART C, MARKUS G, DITMARS S, CONNER L, JAMINET J, TAILLACQ A, MILLER J, LEAVESLEY B, DEARCOS P, HUTCHENS D. (N.A). Colorado Experience With Discharge Measurements At Parshall Flumes And Assessment Of Parshall Flume Performance. N.A, N.A, 399-421.
21. LUCCHINI, T. (2008). OpenFOAM programming tutorial. Talk, 1–47. [https://doi.org/10.1016/0303-8467\(95\)00031-E](https://doi.org/10.1016/0303-8467(95)00031-E)

22. LUX M. (2010). Medidores De Flujo En Canales Abiertos. Guatemala: Universidad De San Carlos De Guatemala Facultad De Ingeniería Escuela De Ingeniería Civil.
23. MILLÁN, Z., TORRE, L., OLIVA, L; BERENGUER, M. . (2011). Simulación numérica. Ecuación de difusión. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica RIBIM / Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNED., N.A, 1. 2018, De Virtual Pro Base de datos.
24. N.A. (N.A). Condiciones previas para los canales de parshall. N.A , de Open Channel Flow Sitio web: <https://www.openchannelflow.com/blog/upstream-conditions-for-parshall-flumes>.
25. N.A. (2015). Salome: The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation. 2018, de Oficina de software y hardware libre. Universidad Miguel Hernandez de Elche Sitio web: <https://oshl.edu.umh.es/2015/07/20/salome-the-open-source-integration-platform-for-numerical-simulation/>
26. Norma ISO 9826, 1992, Measurement of liquid flow in open channels - Parshall and SANIIRI flumes.
27. Novak P, Guinot V, Jeffrey A, Reeve D. (2010). Hydraulic Modelling an Introduction. New York: Spon Press.
28. Oliveras J.,. (2016). Canal Parshall, el aforador con casi un siglo de historia. 2018, de iagua Sitio web: <https://www.iagua.es/blogs/jordi-oliveras/canal-parshall-aforador-casi-siglo-historia>
29. Parshall RL (1936) The Parshall Measuring Flume. Agricultural Experiment Station, Colorado Agricultural College, Fort Collins, CO, USA, Bulletin 423.
30. Pedroza, E.,, Hurtado, A., Leonel, J., (2012). Variaciones en la calibración de un aforador Parshall. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(3), 35-51. Recuperado en 19 de septiembre de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000300003&lng=es&tlng=es.
31. Pedroza, E., (2001). Canal Parshall, *serie autodidactica de medición*, pág. 2.
32. ROCHA Arturo. Hidráulica de tuberías y canales. Figura 1.9 Distribución de velocidades en un canal.

33. ROJAS, Luis., (2017). Modelamiento Fenomenológico De Canaleta Parshall Usando Opensource (Openfoam 16.10) Y Simflow 3.1 y Generación De Algoritmo De Generación Automática De geometría Usando Diseño Hidráulico Asistido Por Computador (Cad) Y Python.
34. ROJAS L. (2017). Introducción a OpenFoam. 2018, de Semillero de Modelación Ambiental (GRUPO SYRAS) - Universidad Manuela Beltrán (Programa Ingeniería Ambiental) Sitio web: <http://modelacionambientalumb.blogspot.com/2017/01/que-es-openfoam-openfoam-es-un-software.html>
35. SAVAGE, B., HEINER, B., Y BARFUSS, S., (2013). Parshall flume discharge correction coefficients through modelling, *Institution of Civil Engineers publishing*. 167,279-287.
36. TAIZ, P. N., & ZEIGER, A. J. (2011). Water Balance of Plants. In *Plant Physiology* (pp. 47– 57). <https://doi.org/10.1104/pp.900074>
37. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (1950), Measuring Water in Irrigation Channels with Parshall Flumes and Small Weirs, *circular No. 843*, 2-64.
38. WAHL T., (2012). Performance Limits of Width-Contracted Flumes. *EWRI/IAHR Conference on Hydraulic Measurements and Experimental Methods*.
39. ZERIHUN, Y. (2016). A Numerical Study on Curvilinear Free Surface Flows in Venturi Flumes, *MPDI*, 1-20