 Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña - Colombia Vigencia Mineducación	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
	Dependencia	Aprobado		Pág.
	DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		i(154)

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	MANUEL GEOVANY AREVALO SILVA ABEL MAURICIO CARDENAS CHINCHILLA		
FACULTAD	INGENIERIAS		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERIA MECANICA		
DIRECTOR	PEDRO JULIAN GARCIA GUARIN		
TÍTULO DE LA TESIS	SIMULACION MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO		
RESUMEN			
<p>EL PRESENTE PROYECTO SE DESARROLLO BAJO LA NECESIDAD DE REALIZAR LA MODELACIÓN DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD) EN UN CANAL ABIERTO. LA CFD ES UN ENFOQUE ÚTIL PARA RESOLVER LAS ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL MOVIMIENTO DE LOS FLUIDOS, MEDIANTE MÉTODOS NUMÉRICOS Y TÉCNICAS COMPUTACIONALES. LA HERRAMIENTA OPENFOAM ES UN SOFTWARE DE USO LIBRE QUE APLICA LOS CONCEPTOS DE LA CFD PARA SOLUCIONAR UN PROBLEMA ESPECÍFICO.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 154	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM: 2



**SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE
VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN
CANAL ABIERTO**

AUTORES

**MANUEL GEOVANY ARÉVALO SILVA
ABEL MAURICIO CÁRDENAS CHINCHILLA**

Proyecto presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director

PEDRO JULIÁN GARCÍA GUARÍN

© MS. Ing. Electromecánico

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA MECANICA

Ocaña, Colombia

Enero de 2018

Dedicatoria

Este trabajo de grado se lo quiero dedicar primero que todo a Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial de mi vida. Por los triunfos y las derrotas en el transcurso de mi camino de vida.

A mi madre Analida Silva Sánchez, por ser el pilar más importante y la persona que siempre me brinda su apoyo incondicional que con sus enseñanzas me guio a ser la persona que soy

A mi padre Geovany Arévalo Claro, que no solo se conformó con ser un padre si no también mi maestro de vida, a pesar de no contar con su presencia siento que está conmigo siempre, sé que este momento hubiera sido igual de importante para el como para mí.

A mi hermano Oscar Arévalo Silva, por su cariño, amistad y apoyo en cada momento

A mis maestros por la paciencia y dedicación al momento de transmitirnos sus conocimientos

A mis compañeros que a pesar de tan duro camino siempre estuvieron apoyándome y animándome para culminar este ciclo.

Al ingeniero Pedro Julián García, director de tesis, por transmitirme cada una de sus ideas, por la valiosa guía, y primordialmente por su amistad.

Por último y el más importante a mi hijo Ilhan Thomas Arévalo Guerrero por ser mi motor mi motivo y mi todo ante las adversidades que se me puedan presentar en la vida.

MANUEL GEOVANY ARÉVALO SILVA

Dedicatoria

Primero que todo quiero darle gracias a Dios por permitirme terminar mi carrera

A mi familia en especial a mi madre Magaly Cárdenas Chinchilla ya que ha estado en todo momento apoyándome.

A mi pareja Laura Aguirre Henao por apoyarme en los momentos difíciles y darme fortaleza y a mi hija Isabel Cárdenas Aguirre por ser ese motivo por el cual luchar y querer salir adelante.

A la universidad francisco de paula Santander Ocaña en la cual tuve experiencias muy agradables, conocí personas que con el transcurrir de mis estudios me ayudaron

A mi compañero de tesis Manuel Arévalo Silva, porque, además de trabajar en este proyecto fue un gran amigo durante la carrera

A todos los profesores, por brindarme con la mejor disposición todos sus conocimientos, en especial al director de mi tesis pedro Julián García, al ingeniero Jhon Arévalo toscano y Leonardo navarro torrado, por ayudarnos y guiarnos en este proyecto en el cual aprendí cosas que serán importantes en mi vida profesional.

Agradecer a todas las personas que hicieron posible y estuvieron ayudándome a cumplir este gran logro

A mi abuela María Emma Chinchilla que, aunque no esté conmigo, sé que desde el cielo siempre me ayudo.

Todo sea para la gloria y honra de Dios.

ABEL MAURICIO CÁRDENAS CHINCHILLA

Índice

	Pág.
Resumen.....	12
Introducción.....	14
Capítulo 1. Simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto.....	15
1.1 Planteamiento Del Problema.....	15
1.2 Formulación Del Problema.....	16
1.3 Descripción Del Problema.....	16
1.4 Objetivos.....	16
1.4.1 General.....	16
1.4.2 Específicos.....	16
1.5 Justificación.....	17
1.6 Delimitaciones.....	18
1.6.1. Geográfica.	18
1.6.2. Conceptual.	18
1.6.3. Operativa.....	18
1.6.4. Temporal.....	18
Capítulo 2. Marco Referencial.....	19
2.1 Marco Histórico.....	19
2.1.1 Historia de los canales abiertos a nivel mundial.....	19
2.1.2 Historia de los canales abiertos a nivel nacional.....	20
2.1.3 Historia de los canales abiertos a nivel Local.....	24
2.2 Marco Conceptual.....	25
2.2.1 Canales.....	25
2.2.1.1 Canales naturales.....	25
2.2.1.2 Canales artificiales.....	25
2.2.2 Flujo Hidráulico.....	25
2.2.2.1 Flujo.....	25
2.2.2.2 Clasificación de Flujos.....	26
2.2.2.2.1 Flujo Laminar.....	26
2.2.2.2.2 Flujo Turbulento.....	26
2.2.2.2.3 Flujo Uniforme.....	26
2.2.2.2.4 Flujo Permanente.....	26
2.2.3 Software OpenFOAM.....	26
2.2.4 Software Salome.....	28
2.2.5 Software paraview.....	28
2.3 Marco Teórico.....	29
2.3.1 Teoría sobre el Flujo en Canales Abiertos.....	29
2.4 Marco legal.....	38
Capítulo 3. Metodología.....	43
3.1 Tipo de investigación.....	43
3.2 Población.....	44
3.3 Muestra.....	44
3.4 Técnicas de recolección de información.....	44

3.5 Análisis de la información.....	45
Capítulo 4. Administración del proyecto.....	46
4.1 Recursos humanos.....	46
4.2 Recursos institucionales.....	46
4.3 Recursos financieros.....	46
Capítulo 5. Presentación de resultados.....	47
5.1 Generar condiciones del flujo laminar en un canal abierto para determinar el campo de velocidades y presiones del canal.....	47
5.2 Implementar el código necesario en OpenFOAM para estimar el campo de velocidades y presiones en un canal abierto.....	55
5.3 Calcular por medio de las ecuaciones que utiliza el software para determinar los valores de velocidades y presiones y el cambio de su interfase en el canal abierto.....	74
Conclusiones.....	121
Recomendaciones.....	122
Referencias.....	123
Apéndice.....	125

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores de coeficiente de Manning n.....	32
Tabla 2. Coordenadas de acuerdo con cada punto.....	51
Tabla 3. Condiciones de frontera para la velocidad de 3 vueltas.....	65
Tabla 4. Condiciones de frontera para la velocidad de 4 vueltas.....	66
Tabla 5. Condiciones de frontera para la velocidad de 5 vueltas.....	66
Tabla 6. Datos de la Pendiente del canal.....	85
Tabla 7. Datos de Caudal real.....	86
Tabla 8. Datos de la Velocidad real.....	86
Tabla 9. Interpolación 1.....	88
Tabla 10. Interpolación 2.....	89
Tabla 11. Interpolación 3.....	90
Tabla 12. Interpolación 4.....	92
Tabla 13. Interpolación 5.....	93
Tabla 14. Interpolación 6.....	94
Tabla 15. Interpolación 7.....	95
Tabla 16. Interpolación 8.....	96
Tabla 17. Interpolación 9.....	98
Tabla 18. Interpolación 10.....	99
Tabla 19. Interpolación 11.....	100
Tabla 20. Interpolación 12.....	101
Tabla 21. Interpolación 13.....	102
Tabla 22. Interpolación 14.....	103
Tabla 23. Interpolación 15.....	104
Tabla 24. Interpolación 16.....	105
Tabla 25. Interpolación 17.....	106
Tabla 26. Interpolación 18.....	107
Tabla 27. Interpolación 19.....	108
Tabla 28. Interpolación 20.....	108
Tabla 29. Interpolación 21.....	109
Tabla 30. Interpolación 22.....	109
Tabla 31. Interpolación 23.....	109
Tabla 32. Interpolación 24.....	110
Tabla 33. Interpolación 25.....	110
Tabla 34. Interpolación 26.....	111
Tabla 35. Interpolación 27.....	111
Tabla 36. Interpolación 28.....	111
Tabla 37. Interpolación 29.....	112
Tabla 38. Interpolación 30.....	112
Tabla 39. Interpolación 31.....	113
Tabla 40. Interpolación 32.....	113
Tabla 41. Interpolación 33.....	113
Tabla 42. Interpolación 34.....	114
Tabla 43. Comparación de datos de la velocidad.....	114
Tabla 44. Comparación de datos de altura del fluido.....	115
Tabla 45. Toma de datos de presiones en malla Tetrahedrons.....	116
Tabla 46. Toma de datos de presiones en malla Hexahedrons.....	116

Tabla 47. Diferencia velocidad 3 vueltas.....	117
Tabla 48. Diferencia de velocidad 4 vueltas.....	118
Tabla 49. Diferencia de velocidad 5 vueltas.....	119
Tabla 50. Diferencia en porcentaje de altura del fluido.....	120

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Sección Rectangular.....	35
Figura 2. Sección transversal para canales trapezoidales.....	36
Figura 3. Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos.....	37
Figura 4. Canal abierto.....	49
Figura 5. Dimensiones del canal abierto.....	49
Figura 6. Mecanismo de basculación.....	50
Figura 7. Dimensión interior del canal abierto.....	50
Figura 8. Creación de puntos en coordenadas cartesianas.....	51
Figura 9. Geometría de canal abierto en salome.....	52
Figura 10. Malla tetrahedrons.....	53
Figura 11. Malla hexahedrons.....	53
Figura 12. Datos de la malla tetrahedrons.....	54
Figura 13. Datos de la malla hexahedrons.....	54
Figura 14. Condiciones iniciales para la velocidad.....	56
Figura 15. Limitaciones de los campos con respecto a la presión.....	58
Figura 16. Condiciones iniciales para el agua en cada frontera.....	60
Figura 17. Condiciones iniciales para la gravedad.....	61
Figura 18. Propiedades de transporte.....	62
Figura 19. Condiciones de la malla.....	63
Figura 20. Condiciones de propiedades del flujo.....	64
Figura 21. Definición de intervalos de tiempo y tiempo de toma de datos en el software de openfoam.....	68
Figura 22. Código de ideasUnvToFoam.....	69
Figura 23. Código de setField.....	70
Figura 24. Código de checkMesh.....	70
Figura 25. Código del solucionador interFoam.....	71
Figura 26. Código paraFoam.....	72
Figura 27. Malla tetrahedrons.....	72
Figura 28. Malla Hectahedrons.....	73
Figura 29. Análisis de conservación de masa.....	77
Figura 30. Distancia a escala de los puntos a analizar.....	83
Figura 31. Distancia real de los puntos a analizar.....	83
Figura 32. Análisis de alturas.....	84

Resumen

La dinámica de fluidos computacional (DFC) es un enfoque útil para resolver las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos, mediante métodos numéricos y técnicas computacionales. La herramienta OpenFOAM es un software de uso libre que aplica los conceptos de la DFC para solucionar un problema específico.

OpenFOAM es un paquete de software CFD libre de código abierto, que tiene una gran base de usuarios en la mayoría de las áreas de la ingeniería y la ciencia, cuenta con una amplia gama de características para resolver cualquier tipo de flujos de fluidos complejos que involucran reacciones químicas, la turbulencia y la transferencia de calor, a la dinámica de sólidos y electromagnetismo. Incluye herramientas para mallar, en particular snappyHexMesh, un mallador paralelizado, para geometrías CAD complejas, y para el pre y post procesamiento. Casi todo (incluyendo mallado, pre y post-procesamiento) se ejecuta en paralelo como estándar, permitiendo a los usuarios sacar el máximo provecho de equipos informáticos a su disposición. Es por esta razón que este trabajo de grado se realizó la simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto, en el cual se realizaron las siguientes fases.

Fase 1. Generar condiciones del flujo laminar en un canal abierto para determinar el campo de velocidades y presiones del canal.

Fase 2. Implementar el código necesario en OpenFOAM para estimar el campo de velocidades y presiones en un canal abierto.

Fase 3. Calcular por medio de las ecuaciones que utiliza el software para determinar los valores de velocidades y presiones y el cambio de su interfase en el canal abierto.

Con la realización de estas fases se logró la simulación mediante el software de OpenFOAM el campo de velocidades, presiones y el cambio de interface del canal abierto de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Introducción

Este trabajo de grado se hizo con el fin de realizar una simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña en la cual se realizaron pruebas donde se analizaron a través de una guía de laboratorio diversos fenómenos, esta guía dividida en diferentes prácticas, una de ellas el estudio con ecuaciones semi-empíricas las cuales limitan al estudiante con la parte matemática ya que estos cálculos son promedios tratando de mejorar, evolucionar y comparar con el método a proponer de volumen de fluido usado para fases múltiples con el fin de que el estudiante logre apreciar las unidades del fenómeno físico real.

Para lograr esta investigación se generaron condiciones del flujo laminar en un canal abierto para determinar el campo de velocidades y presiones del canal. Lugo se implementó el código necesario en OpenFOAM para estimar el campo de velocidades y presiones en el canal abierto. Y por último se realizaron los cálculos por medio de las ecuaciones que utiliza el software para determinar los valores de velocidades y presiones y el cambio de su interfase en el canal abierto; para lograr la simulación mediante el software de OpenFOAM el campo de velocidades, presiones y el cambio de interface en el canal abierto ubicado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Capítulo 1. Simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto

1.1 Planteamiento Del Problema

El conocimiento empírico del funcionamiento de los canales se remonta a varios milenios, esto es evidente si se piensa en la lucha del hombre por la supervivencia, que lo obligó a aprender a utilizar y controlar el agua. Los primeros ingenieros tuvieron que encontrar una forma de transporte para el agua lo más cerca de sus sembradíos para poder aliviar en gran medida el inmenso problema del riego de sus cultivos y las demás utilidades que esta brinda, de todo esto emergen los canales de transporte de agua los cuales son conductos naturales por donde fluye un líquido, impulsado solo por la acción de la gravedad, su superficie esta libre a la presión atmosférica y se encuentra rodeado por un contorno sólido.

Comúnmente se suelen apreciar obras de canales en diversos lugares, por lo tanto, es importante saber las diferentes maneras que podrían tomar a lo largo de su desplazamiento, pero en realidad es muy poco el conocimiento que se tiene sobre ello, como son los diferentes métodos de análisis para flujo uniforme lo cual impide llevar a cabo trabajos de forma rápida.

Actualmente se encuentra ubicada una estructura de canal abierto en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña en la cual se realizan pruebas donde se analiza a través de una guía de laboratorio diversos fenómenos, esta guía se divide en diferentes practicas una de ellas se estudia con ecuaciones semi-empíricas las cuales limitan al estudiante con la parte matemática ya que estos cálculos son promedios tratando de mejorar y evolucionar se aspira a comparar con el método a proponer de volumen de fluido usado para fases múltiples con el fin de que el estudiante logre apreciar las unidades del fenómeno físico real.

1.2 Formulación Del Problema

¿Cómo simular y que estrategias pueden ser usadas para analizar el campo de velocidades y presión laminar en un canal abierto con el propósito de comparar este fenómeno utilizando método de volumen de fluido usado para fases múltiples respecto a métodos semi-empíricos?

1.3 Descripción Del Problema

En el laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, se encuentra un canal abierto en el cual se realizan prácticas, en el cual por medio de fórmulas semi-empíricas, y con algunos datos de entrada, hallan velocidades, presiones y el cambio de interface liquido-gas. Esta práctica es beneficiosa para los estudiantes de ingeniería civil e ingeniería mecánica que son los que la realizan, pero, se podría dar un valor agregado a dicha práctica.

Ese valor agregado es que el estudiante, pueda ver de una manera gráfica que sucede dentro del canal, con la simulación se podría observar diferentes casos y analizar los resultados sin tener que hacer cambios al momento de hacer el laboratorio, ahorrando tiempo y verificando el comportamiento del fluido en los diferentes casos que simule. (Ver apéndice 1).

1.4 Objetivos

1.4.1 General. Simular mediante el software de OpenFOAM el campo de velocidades, presiones y el cambio de interface en un canal abierto.

1.4.2 Específicos

Generar condiciones del flujo laminar en un canal abierto para determinar el campo de velocidades y presiones del canal.

Implementar el código necesario en OpenFOAM para estimar el campo de velocidades y presiones en un canal abierto.

Calcular por medio de las ecuaciones que utiliza el software para determinar los valores de velocidades y presiones y el cambio de su interfase en el canal abierto

1.5 Justificación

En el siguiente trabajo de grado se plantea la idea de modelar y analizar el comportamiento que tiene un flujo uniforme cuando es conducido a lo largo de un canal en el cual se pueden presentar variaciones en la velocidad, presión e interface liquido-gas, con el fin de contribuir y mejorar los aspectos académicos de los estudiantes que realizaran la práctica.

En este caso se trabajará en el canal abierto que se encuentra disponible en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, con el fin de obtener un análisis de datos ante el comportamiento de las variables (velocidades y presiones) y del canal, donde se comparan estos valores con los generados en la simulación por el software de OpenFOAM.

Ya que el software de OpenFOAM no es conocido por los estudiantes de ingeniería Mecánica e ingeniería Civil que son los que realizan la práctica, se aspira que vean en este software una nueva herramienta útil y novedosa, en el cual se pueden simular diversos casos en el canal abierto y se realice un análisis de las ecuaciones que el software utiliza. Al implementar las ecuaciones con las que el software resuelve las problemáticas, se quiere obtener que los resultados sean más exactos en comparación con el método semi-empírico que se utiliza en la actualidad, para que al momento de aplicarlos en la vida cotidiana se pueda dar una mejor solución al problema que se requiera.

Al realizar la simulación en el software de OpenFOAM se pretende que el estudiante logre observar de manera gráfica el comportamiento del flujo uniforme que circula por el canal con el fin de que éste se lleve una imagen de lo que ocurre dentro de un canal y no se quede solamente con la parte teórica.

Con la modelación se busca generar un apoyo al momento de la realización de prototipos con el fin de observar de manera virtual la finalidad de un proyecto, el beneficio que nos brinda es que nos permite apreciar las posibles fallas que se pueden presentar antes de su construcción, esto nos da un ahorro financiero.

1.6 Delimitaciones

1.6.1. Geográfica. El proyecto se llevará a cabo en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, en la Universidad Francisco de Paula Santander en el laboratorio de hidráulica.

1.6.2. Conceptual. La temática del proyecto se enmarcará en los siguientes conceptos: canales, canales naturales, canales artificiales, flujo hidráulico, flujo, clasificación de flujos, flujo laminar, flujo turbulento, flujo uniforme, flujo permanente, software openfoam

1.6.3. Operativa. Se analizará el canal abierto donde se hallarán los campos de velocidades y presiones para determinar coeficiente de rugosidad, además se harán simulaciones en el programa openfoam y se analizara el comportamiento del fluido.

1.6.4. Temporal. El presente proyecto tendrá una duración aproximada de 8 semanas a partir de la fecha de aprobación del anteproyecto.

Capítulo 2. Marco Referencial

2.1 Marco Histórico

2.1.1 Historia de los canales abiertos a nivel mundial.

Los canales han sido importantes a lo largo de la historia, desde su comienzo el ser humano en su lucha por sobrevivir y tener la comida del campo por medio de la siembra, han tenido la necesidad de cuidar sus cultivos, necesidad como buscar la manera de transportar el agua hacia sus cultivos, para poder regarlas y así tener el resultado deseado. (Corcho Romer, 2010).

Por ese motivo empezaron a utilizar los canales abiertos, la historia registra que empezaron a tomar importancia en el año 4000 al 2000 A.C. fue cuando los egipcios y fenicios debido a los problemas que tenían con el agua, en la construcción de sus barcos y puertos, dieron inicio a explorar todo lo que concierne a dichos canales. En ese tiempo China, India, Pakistán, Egipto, entre otros emprendieron el desarrollado de los sistemas de riego. Debido a los problemas que tenía China profundizo más en el tema e implemento sistemas de protección contra inundaciones. (Corcho Romer, 2010)

Alrededor de los años 500 A.C. en la antigua Grecia se construyeron acueductos, gracias a ello, se empezaron a desarrollar formulas y se hicieron los primeros intentos para la elaboración de modelos matemáticos. En el siglo XVI se desarrollaron los principios de la hidráulica en los que los científicos Keppler y Torricelli fueron quienes dieron los primeros aportes y en el año 1800 reconocidos científicos como Bernoulli, Newton y Euler, hicieron sus aportes y perfeccionaron estos principios. En el año de 1795 el arquitecto naval William Froude, señaló la fuerte relación que hay entre la fuerza de inercia y la fuerza de la gravedad, hoy en día esta relación se denomina el número de Froude, utilizado en el análisis de los

modelos hidráulicos, siendo un parámetro adimensional. En el año 1885 Reynolds noto la importancia entre la fuerza de la inercia y la fuerza de fricción interna al aplicarla en el diseño de los modelos hidráulicos, hoy en día esta relación se conoce como número de Reynolds, siendo este un parámetro adimensional. (Corcho Romer, 2010)

Según registros los canales de riego tuvieron lugar en la antigua Mesopotamia, en el imperio de Roma tenían inmensos acueductos con los cuales conducían el agua por medio de canales, para poder abastecerse de dicho líquido. El estudio de los canales se remonta al siglo XVIII, con personas importantes que hicieron sus aportes como Chézy, Bazin y otros. Dichos estudios parten de la necesidad del hombre a sobrevivir, que más adelante dio origen a la ingeniería de canales, conociendo hoy en día su comportamiento, funcionalidad y clasificación.

2.1.2 Historia de los canales abiertos a nivel nacional.

En Bogotá el desarrollo de los primeros centros poblados condujo a la construcción de los acueductos, que mediante canales abiertos conducían por gravedad el agua hasta las plazas centrales, donde la gente la tomaba en pilas públicas, sin acceso domiciliario y sin ningún tratamiento. (Lopez Cualla, 2011)

Construcción del primer acueducto de la ciudad 1584. Consistió en una conducción de aguas desde el río San Agustín hasta la plaza principal, mediante una cañería de cal, ladrillo y piedra que pasaba por una zona en la que existían arbustos de laurel, motivo por el cual se le llamó Acueducto o Cañería de los laureles.

Construcción de la pila de las nieves en 1665. La única tarea de importancia realizada en el siglo XVII para mejorar el acueducto de la ciudad.

Desde el último cuarto del siglo XIX, período que se caracterizó por la vinculación del capital privado a su configuración, la segunda referida a la llamada municipalización y

participación del sector público en el desarrollo de los servicios públicos y la tercera que corresponde a la última década del siglo XX y lo que va corrido del siglo XXI desde la Constitución del 91, la expedición de las leyes 142 y 143 de 1994, sus modificaciones y la reglamentación de las mismas. (Lopez Cualla, 2011)

Vale decir que los últimos 25 años del siglo XIX marcan un hito en el proceso de provisión de los servicios públicos, básicamente en las principales ciudades del país, teniendo en cuenta que desde el régimen colonial y hasta más allá de la primera mitad del siglo XIX, no existieron condiciones económicas, políticas, jurídicas e institucionales para generar el desarrollo de este tipo de valores urbanos que complementan necesariamente los procesos de desarrollo capitalista.

Las contradicciones suscitadas por los cambios de un país agricultor y pastoril a un país de incipiente manufactura, de algún desarrollo comercial y de diversas formas de acumulación aunado a las guerras civiles, desembocaron en una serie de problemas de orden social, urbanístico, espacial y colectivo, para lo cual nadie estaba preparado y eran evidentes las serias limitaciones de orden financiero, técnico y fiscal para resolverlos. (Lopez Cualla, 2011)

Lo que se conoce desde el régimen colonial y que perduró durante buena parte del siglo XIX en materia de acueducto, es la referencia a la construcción de acequias al descubierto construidas en piedra, cuyas aguas provenían de fuentes cercanas que alimentaban pilas públicas sin acceso domiciliario, y sin ningún tratamiento. Tal como lo señala Lizcano, Rey y Espinosa:

“El desarrollo de los primeros centros poblados condujo a la construcción de los acueductos, que mediante canales abiertos conducían por gravedad el agua hasta las plazas centrales, donde la gente la tomaba en pilas públicas. (...) En Villa de Leyva aún es funcional

el canal de los españoles, con trazado de curvaturas y pendiente que por gravedad conduce a lo largo de un tramo de 12 km de largo”. (Lizcano, 2011)

En efecto durante una extensa etapa de los primeros 350 años de historia de la ciudad de Bogotá, la provisión de agua se dio mediante la canalización de aguas provenientes de los ríos arzobispo, San Francisco, San Agustín, Fucha y Tunjuelo.

El dato más antiguo hacia 1689 nos señala que se autorizó emprender obras para conducir el agua desde el río Fucha, se trataba de una acequia a cielo abierto, recubierta en algunos tramos por lajas de piedra y cal y canto que desembocaba en una pila de uso público (plaza principal). (Lopez Cualla, 2011)

A mediados del siglo XVIII, un derrumbe acabó con esta conducción la cual fue reemplazada por las aguas del río San Francisco cuyas especificaciones eran mejores, se le conoció en su tiempo como el “acueducto” de Agua Nueva el cual determinó en 1747. (Jaramillo, 1998)

Hubo otras conducciones menores y aljibes caseros.

La autoridad municipal otorgaba concesiones que indicaban el monto del agua que se podía explotar teniendo como contraprestación la construcción de las pilas de uso público y el mantenimiento de las instalaciones.

Hacia 1800 la ciudad tenía más de 25.000 habitantes y había y cerca de 20 pilas públicas. Recoger el agua era todo un rito en la ciudad, pues era el momento para transmitir el “chisme” y la socialización de acontecimientos ciudadanos, también para contar con la presencia de los profesionales del agua, los llamados “aguateros” que la envasaban en cántaros de barro y la transportaban en burros, ofreciendo un servicio domiciliario. Este régimen no cambió mucho con el advenimiento de la independencia en 1819, ni por el tamaño ni la estructura de la ciudad, que durante las cuatro primeras décadas de la Republicano sufrió mayores alteraciones. (Lopez Cualla, 2011)

Si bien todo permaneció igual desde la Colonia hasta la primera mitad del siglo XIX, diversos hechos globales como la articulación al mercado internacional alrededor del café y la centralización política como producto de la constitución del 86 y procesos de acumulación sostenida, ampliaron el mercado interno y la capacidad económica del país, se incrementaron los recursos fiscales y el consumo, sobre todo en las ciudades grandes, entre ellas Bogotá.

También desde los países del centro como Francia o EE. UU. Se propagaban o se transmitían nuevos conceptos de comodidad y confort y nuevos estilos de consumo, así como preceptos relacionados con la higiene, la salud pública, el agua potable y el saneamiento básico, llevaron a cambiar los patrones de convivencia social en las ciudades.

En el año de 1886 se instaló en Bogotá un sistema de Acueducto y Alcantarillado con tubos de hierro galvanizado, siendo su primer contratista don Juan Ramón Jimeno (barranquillero), quien se trató de una excepción, pues por lo regular los inversionistas eran agentes de la misma localidad que canalizaban el ahorro de la municipalidad.

Este sistema superaba las acequias canalizadas en piedra, que señalamos atrás, o aún las “tuberías” en barro cocido que en algunos sitios estaban en funcionamiento, pero eran muy susceptibles a las filtraciones y a la contaminación ambiental. (Lopez Cualla, 2011)

Un censo a final de siglo muestra como bajo este nuevo sistema se contaba con seis acueductos con un aforo total de 265 litros por segundo, de los cuales “Agua nueva” aportaba 127 litros. Hacia 1897 el acueducto en Bogotá tenía unas 2.800 acometidas domiciliarias, lo que representaba el 20.5% de los hogares de la ciudad, sin contar las destinadas a oficinas, industria y comercio (Jaramillo, 2012)

Sólo hasta 1905 en Cartagena y Medellín empezó a funcionar un acueducto metálico de similares características.

Respecto al alcantarillado, si bien existían preocupaciones de orden ciudadano, la percepción que se tenía era de orden individualista, pues el hecho de verter “aguas servidas

“en los alrededores, era un problema que afectaba a “otros”, por lo tanto, no era una preocupación que se consolidara en el tejido social.

Sólo a finales de 1875 se construye por el municipio de Bogotá, un vertedero subterráneo que atendía al centro l y se complementaba con trabajos privados que desembocaban en los ríos de la ciudad. Sin embargo, las epidemias que azotaron la ciudad hicieron que el municipio tomara medidas más radicales al respecto. (Lopez Cualla, 2011)

En 1885 se creó una Junta de Aguas y en 1887 la Comisión Permanente del Ramo de Aguas que asumió el tema de los drenajes y desagüe. En 1890 se prohibieron las acequias a cielo abierto, sin embargo la estructura para la evacuación de aguas servidas no obedecía a ningún plan, eran sistemas rudimentarios, conductos de ladrillo con losas de piedra, que funcionaban como tapas, las cuales permitían infiltraciones contaminantes y no resistían aguaceros fuertes de la época lluviosa Sin embargo la canalización del río San Francisco que era una verdadera cloaca a cielo abierto y foco de infecciones, obra iniciada en 1884, que cubría las carreas 7 y 8, alivió de alguna manera las condiciones sanitarias del centro de la ciudad, sin embargo su avance fue lento completándose sólo hacia 1950.(Jaramillo, 1998)

2.1.3 Historia de los canales abiertos a nivel Local.

Según las investigaciones realizadas sobre el Análisis y simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto, no se encontraron trabajos relacionados al tema en Ocaña Norte de Santander y su región.

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Canales

Son conductos abiertos o cerrados por donde circula un fluido, sea líquido o gas, el cual fluye por acción de la gravedad, y sin ninguna presión, ya que la superficie del fluido está en contacto con la atmósfera, por lo cual el fluido es impulsado por la presión atmosférica y de su mismo peso. Los canales pueden ser naturales o artificiales. (Hughes, 2000)

2.2.1.1 Canales naturales

Son aquellos que se encuentran de manera natural y en el cual circula un fluido en la tierra, varían en su tamaño, pequeño como arroyuelos, los cuales se encuentran en zonas montañosas, hasta canales naturales de gran extensión como arroyos, quebradas y ríos. (Hughes, 2000)

2.2.1.2 Canales artificiales

Los canales artificiales son aquellos los cuales son construidos por el hombre, y son construidos para cubrir una necesidad como, por ejemplo: sistemas de riego, alcantarillado, navegación para transporte de cargas, cunetas paralelas a carreteras, control de inundaciones entre otras muchas más aplicaciones. (Hughes, 2000)

2.2.2 Flujo Hidráulico

2.2.2.1 Flujo

Estudio del movimiento y comportamiento de un fluido, este estudio comprende las leyes del movimiento de la física, las propiedades del fluido y características del medio por donde fluye. La rama encargada de estudiar dicho movimiento es la Hidrodinámica. (Hughes, 2000)

2.2.2.2 Clasificación de Flujos

2.2.2.2.1 Flujo Laminar

Se caracteriza porque el movimiento de las partículas del fluido se produce siguiendo trayectorias regulares, separadas y definidas dando la impresión de que se trata laminas o capas más o menos paralelas entre sí, deslizándose suavemente una sobre otra. El movimiento de las partículas tiene solamente el sentido y la dirección del movimiento principal del fluido. (Hughes, 2000)

2.2.2.2.2 Flujo Turbulento

En este tipo de flujo las partículas del fluido se mueven en trayectorias erráticas, irregulares y sin un orden establecido, ocasionando la trasferencia de cantidad de movimiento de una porción de fluido a otra. Las partículas del fluido tienen desplazamientos en diferentes sentidos al movimiento principal del fluido, las partículas al moverse en sentido errático, tiene como consecuencia el que se presenten colisiones entre ellas y esto genera cambios en la cantidad de movimiento, que se manifiestan como una pérdida de energía. (Hughes, 2000)

2.2.2.2.3 Flujo Uniforme

Un flujo es uniforme cuando en cualquier parte del fluido el vector de velocidad es idéntico con respecto al espacio. (Hughes, 2000)

2.2.2.2.4 Flujo Permanente

El flujo es permanente cuando las propiedades de un fluido y las condiciones del movimiento del mismo no cambian en un punto con respecto al tiempo. (Hughes, 2000)

2.2.3 Software OpenFOAM

(Open Field Operation and Manipulation)

OpenFOAM es uno de los pocos softwares libres relacionados con la dinámica de fluidos computacional (CFD), OpenFOAM presenta grandes ventajas frente al resto, ES UN SOFTWARE LIBRE, mientras que con los demás el licenciamiento resulta costoso o limitado. Sin embargo, los demás programas tienen una curva de aprendizaje más rápida y existe gran desarrollo por mejorar sus procesos de simulación cada año y disponen de mucha información. OpenFOAM es un software de código abierto que estudia el comportamiento de los fluidos. Tiene múltiples aplicaciones para resolver problemas relacionados con la dinámica de fluidos, como reacciones químicas, turbulencias, transferencias de calor o electromagnetismos. (Parra Viol, 2015)

OpenFOAM es un conjunto de aplicaciones o funciones en que permiten solucionar diferentes problemas utilizando el método de los volúmenes y elementos finitos. Desde el *Terminal* de Linux se llaman o invocan estas funciones o programas. Los programas utilizan la información de archivos planos para realizar su tarea y por lo general crean nuevos archivos donde se encuentran los resultados. Es decir que nuestro trabajo es crear estos archivos planos con los datos del problema y la configuración que creemos apropiada para que las funciones puedan realizar su objetivo. (Parra Viol, 2015)

Normalmente el proceso de solución un problema de CFD se puede resumir en tres pasos:

1. Pre-procesamiento: se crea la malla discreta y la configuración del problema
2. Solución: del problema utilizando las herramientas y modelos adecuados para el problema
3. Post-procesamiento: se visualizan y analizan los resultados

OpenFOAM cuenta con funciones o programas independientes para cada uno de los pasos de la solución del problema. Desde luego, también se pueden crear o modificar nuevos programas.

ParaFoam es una herramienta gráfica que permite manipular y observar los resultados.

2.2.4 Software 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 LGPL. Puede descargar tanto el código fuente como los ejecutables desde este sitio. (Salome.org, 2016)

2.2.5 Software paraview

ParaView es una aplicación de visualización y análisis de datos de fuente abierta y multiplataforma. Los usuarios de ParaView pueden construir rápidamente visualizaciones para analizar sus datos utilizando técnicas cualitativas y cuantitativas. La exploración de datos se puede realizar de forma interactiva en 3D o mediante programación utilizando las capacidades de procesamiento por lotes de ParaView.

ParaView fue desarrollado para analizar conjuntos de datos extremadamente grandes utilizando recursos de computación de memoria distribuida. Puede ejecutarse en supercomputadoras para analizar conjuntos de datos de tamaño de petascale y también en laptops para datos más pequeños, se ha convertido en una herramienta integral en muchos laboratorios nacionales, universidades e industrias, y ha ganado varios premios relacionados con el cálculo de alto rendimiento. (Paraview.org, 2016)

2.3 Marco Teórico

2.3.1 Teoría sobre el Flujo en Canales Abiertos

El flujo de canales abiertos tiene lugar cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad y solo están parcialmente envueltos por un contorno sólido. En el flujo de canales abiertos, el líquido que fluye tiene superficie libre y sobre él no actúa otra presión que la debida a su propio peso y a la presión atmosférica. El flujo en canales abiertos también tiene lugar en la naturaleza, como en ríos, arroyos, etc., si bien en general, con secciones rectas del cauce irregulares. De forma artificial, creadas por el hombre, tiene lugar en los canales, acequias, y canales de desagüe. En la mayoría de los casos. Los canales tienen secciones rectas regulares y suelen ser rectangulares, triangulares o trapezoidales. También tienen lugar el flujo de canales abiertos en el caso de conductos cerrados, como tuberías de sección recta circular cuando el flujo no es a conducto lleno. En los sistemas de alcantarillado no tiene lugar, por lo general, el flujo a conducto lleno, y su diseño se realiza como canal abierto. (Ven Te Chow, 2012)

Numero de froude

El número de Reynolds y los términos laminar y turbulentos no bastan para caracterizar todas las clases de flujo en los canales abiertos.

El mecanismo principal que sostiene flujo en un canal abierto es la fuerza de gravitación. Por ejemplo, la diferencia de altura entre dos embalses hará que el agua fluya a través de un canal que los conecta. El parámetro que representa este efecto gravitacional es el Número de Froude, puede expresarse de forma adimensional. Este es útil en los cálculos del resalto hidráulico, en el diseño de estructuras hidráulicas y en el diseño de barcos.

$$Fr^2 = \frac{v^2}{gL}$$

- L - parámetro de longitud [m]
- v - parámetro de velocidad [m/s]
- g - aceleración de la gravedad [m/s²]

El flujo se clasifica como: $Fr < 1$, Flujo subcrítico o tranquilo, tiene una velocidad relativa baja y la profundidad es relativamente grande, prevalece la energía potencial. Corresponde a un régimen de llanura.

$Fr = 1$, Flujo crítico, es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico. (Ven Te Chow, 2012)

$Fr > 1$, Flujo supercrítico o rápido, tiene una velocidad relativamente alta y poca profundidad prevalece la energía cinética. Propios de cauces de gran pendiente o ríos de montaña.

Flujo permanente y uniforme

El flujo uniforme permanente es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos. La profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración. En el caso especial de flujo uniforme y permanente, la línea de alturas totales, la línea de altura piezométricas y la solera del canal son todas paralelas, es decir, son todas iguales sus pendientes. (Ven Te Chow, 2012)

La característica principal de un flujo permanente y uniforme en canales abiertos es que la superficie del fluido es paralela a la pendiente del canal, es decir, $dy/dx = 0$ o la profundidad del canal es constante, cuando la pendiente final (S_f) es igual a la pendiente inicial (S_o) del canal. Estas condiciones se dan comúnmente en canales largos y rectos con una pendiente, sección transversal y un revestimiento de las superficies del canal homogéneo, caso típico en regadíos. En el diseño de canales es muy deseable tener este tipo de flujo ya

que significa tener un canal con altura constante lo cual hace más fácil diseñar y construir. Las condiciones de flujo permanente y uniforme solo se pueden dar en canales de sección transversal prismáticas, es decir, cuadrada, triangular, trapezoidal, circular, etc. Si el área no es uniforme tampoco lo será el flujo. La aproximación de flujo uniforme implica que la velocidad es uniforme es igual a la velocidad media del flujo y que la distribución de esfuerzos de corte en las paredes del canal es constante. (Ven Te Chow, 2012)

Bajo las condiciones anteriores se pueden obtener las siguientes relaciones, denominadas relaciones de Chezy–Manning, para la velocidad V y el caudal Q :

$$V = \frac{k}{n} R_H^{2/3} S_0^{1/2},$$

$$Q = \frac{k}{n} A R_H^{2/3} S_0^{1/2},$$

Donde:

K : Valor constante según las unidades a utilizar.

A_c : Área de la sección del Canal.

R_h : Radio hidráulico de la sección.

S_0 : Pendiente del Fondo del Canal.

n : Coeficiente de Mannig

Tabla 1.
Valores de coeficiente de Manning n

Perímetro mojado	n	Perímetro Mojado	n
Canales naturales		Canales artificiales	
Limpios y rectos	0.030	Vidrio	0.010
Fangosos con piscinas	0.040	Latón	0.011
Ríos	0.035	Acero, suave	0.012
		Acero, pintado	0.014
Llanuras de inundación		Acero, remachado	0.016
Pasto, campo	0.035	Hierro fundido	0.013
Matorrales baja densidad	0.050	Concreto terminado	0.012
Matorrales alta densidad	0.075	Concreto sin terminar	0.014
Arboles	0.150	Madera cepillada	0.012
		Baldosa arcilla	0.014
Canales de tierra		Ladrillo	0.015
Limpio	0.022	Asfalto	0.016
Grava	0.025	Metal corrugado	0.022
Melaza	0.030	Madera no cepillada	0.013
Piedra	0.035		

Fuente: (Ven Te Chow, 2012)

En la tabla anterior se observan los valores para el coeficiente de Mannig (n) donde, como se mencionó k vale 1.0 y 1.49 para el sistema internacional (SI) y el británico respectivamente, n se denomina coeficiente de Manning y depende del material de la superficie del canal en contacto con el fluido. (Ven Te Chow, 2012)

En muchos canales artificiales y naturales la rugosidad de la superficie del canal, y por lo tanto el coeficiente de Manning, varia a lo largo del perímetro mojado de este. Este es el caso, por ejemplo, de canales que tienen paredes de concreto armado y con un fondo de piedra, el caso de ríos en épocas de bajo flujo la superficie es completamente de piedras y en épocas de crecidas parte del río fluye por la ladera del río, compuesto generalmente por piedras, arbustos, pasto, etc. Por lo tanto, existirla una rugosidad efectiva que debe ser una

combinación de las distintas rugosidades existentes. Una forma de solucionar este tipo de problemas es dividir el canal tantas secciones como tipos de materiales de pared existan y analizar cada división en forma aislada. Cada una de las secciones tendría su propio perímetro mojado P_i , un área A_i y coeficiente de Manning n_i . Los P_i no deben incluir los límites imaginarios entre las distintas secciones generadas al dividir la superficie original. Este método también es conocido como “Método de superposición para perímetros no uniformes”. (Ven Te Chow, 2012)

Geometría del canal

Un canal con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante se conoce como canal prismático. De otra manera, el canal es no prismático; un ejemplo es un vertedero de ancho variable y alineamiento curvo. Al menos que se indique específicamente los canales descritos son prismáticos.

El trapecio es la forma más común para canales con bancas en tierra sin recubrimiento, debido a que proveen las pendientes necesarias para la estabilidad.

El rectángulo y el triángulo son casos especiales del trapecio. Debido a que el rectángulo tiene lados verticales, por lo general se utiliza para canales construidos para materiales estables, como mampostería, roca, metal o madera. La sección transversal solo se utiliza para pequeñas asqueas, cunetas o a lo largo de carreteras y trabajos de laboratorio. El círculo es la sección más común para alcantarillados y alcantarillas de tamaño pequeño y mediano. (Ven Te Chow, 2012)

Los elementos geométricos de una sección de canal son propiedades que estarán definidas por completo por la geometría de la sección y la profundidad del flujo del canal. Estos elementos son muy importantes para el estudio de los flujos en canales abiertos y las expresiones más características son las siguientes:

$$R_h = A_c/P$$

Donde R_h es el radio hidráulico en relación con el área mojada (A_c) con respecto su perímetro mojado (P).

$$Y_c = A_c/b$$

La profundidad hidráulica D es relación entre el área mojada y el ancho de la superficie.

Eficiencia en canales abiertos

Se conoce que los sistemas de canales abiertos se diseñan con el fin de transportar líquidos desde un lugar determinado hasta otro con una altura de cota menor a la inicial, manteniendo un caudal o una razón de flujo constante bajo la influencia de la gravedad al menor precio posible. Debido a que no es necesario la aplicación de energía al sistema el costo de construcción se traduce al valor inicial una vez comenzados los trabajos, traduciéndose en el tamaño físico de la obra, por tal razón para una longitud establecida el perímetro de la sección representara también el costo del sistema; por lo cual debe mantenerse al mínimo para no incrementar los costos y los tamaños de la sección. Debido a lo anteriormente mencionado, la eficiencia de un canal tiene relación con encontrar un área de paso (A_c) mínima para transportar un caudal (Q) dado, con una pendiente del canal (S_0) y coeficiente de Manning (n) dados. (Ven Te Chow, 2012)

Por lo cual, escribiendo el radio hidráulico como $R_h = A_c/P$ la ecuación de caudal se puede reescribir de la siguiente forma:

$$Q = \frac{k}{n} A \left(\frac{A}{P} \right)^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{k}{n} \frac{A^{5/3} S_0^{1/2}}{P^{2/3}}.$$

Despejando el área (A)

$$A = \left(\frac{nQ}{kS_0^{1/2}} \right)^{3/5} P^{2/5},$$

Donde la cantidad entre paréntesis es constante. La ecuación anterior indica que un área de paso mínima está asociada a un perímetro mojado mínimo y por lo tanto las necesidades

de excavación como de material, para cubrir las superficies del canal, son mínimas, influyendo directamente en los costos de construcción como se mencionó anteriormente.

La forma con el perímetro mínimo por unidad de área es el círculo, por lo tanto, tomando en cuenta la mínima resistencia del flujo en esta sección, la mejor sección transversal para un canal abierto es el semicírculo. Sin embargo, en el campo de la construcción resulta más económico construir un canal con lados rectos como las secciones trapezoidales o rectangulares en vez de un semicírculo, lo que lleva a analizar cuál de las diferentes secciones a utilizar es la más conveniente para el sistema. (Ven Te Chow, 2012)

Secciones Rectangulares

Criterio para mejor sección transversal hidráulica (para canal rectangular):

$$y = \frac{b}{2}$$

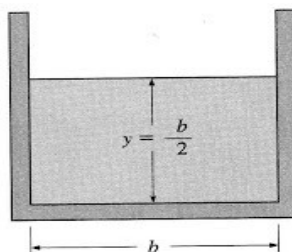


Figura 1. Sección Rectangular

Fuente: (Ven Te Chow, 2012)

Canales Trapezoidales

Para canales trapezoidales se toman los mismos criterios para la sección hidráulica más eficiente:

$$y = \frac{b \operatorname{sen} \theta}{2(1 - \cos \theta)}$$

Como conclusión se puede decir que la mejor sección transversal hidráulica para un canal abierto es la que tiene el máximo radio hidráulico o, proporcionalmente, la que tiene menor perímetro mojado para una sección transversal específica. (Ven Te Chow, 2012)

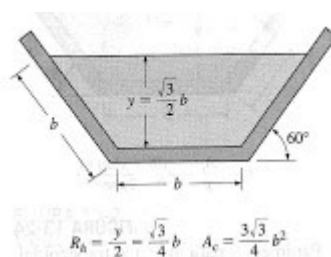


FIGURA 13-25

La mejor sección transversal para canales trapezoidales es la *mitad de un hexágono*.

Figura 2. Sección transversal para canales trapezoidales

Fuente: (Ven Te Chow, 2012)

Energía en canales abiertos

En hidráulica se sabe que la energía total del agua en metros-kilogramos por kilogramos de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección de canal puede expresarse como la altura total en pies de agua, que es igual a la suma de la elevación por

encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad. (Ven Te Chow, 2012)

Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos.

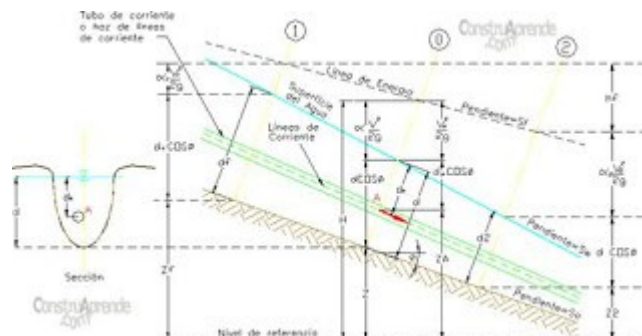


Figura 3. Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos.

Fuente: (Ven Te Chow, 2012)

Por ejemplo, con respecto al plano de referencia, la altura H de una sección 0 que contiene el punto A en una línea de corriente del fluido de un canal de pendiente alta, puede escribirse como:

$$H = z_A + d_A \cos \phi + \frac{V_A^2}{2g}$$

De acuerdo con el principio de conservación de energía, la altura de energía total en la sección 1 localizadas aguas arriba debe de ser igual a la altura de energía total en la sección 2 localizadas aguas abajo más la pérdida de energía h_f entre las dos secciones. (Ven Te Chow, 2012)

$$z_1 + d_1 \cos \phi + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \phi + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h$$

Esta ecuación es aplicable a flujos paralelos o gradualmente variados. Para un canal de pendiente pequeña, esta se convierte en

$$z_1 + d_1 \cos \theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h \rightarrow \cos \theta \cong 0$$

2.4 Marco legal

Constitución Política Nacional: En los artículos 78, 79 y 80 establece que el Estado tiene, entre otros deberes, los de proteger la diversidad e integridad del ambiente; fomentar la educación ambiental; prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental; imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados al ambiente.

Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia. Documento aprobado por el Consejo Nacional Ambiental en 2000; tiene como objetivo propender por el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras.

Como objetivos específicos plantea establecer lineamientos ambientales para el desarrollo de actividades productivas en los espacios oceánicos y zonas costeras; adoptar medidas de conservación, rehabilitación y/o restauración de los ecosistemas marinos y costeros; y proporcionar un ambiente marino y costero sano para contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población. Como parte de este último objetivo, se definió la estrategia de prevención, reducción y control de la contaminación.

Ley 715 de 2001: Establece el Sistema General de Participaciones constituido por los recursos que la Nación transfiere a las entidades territoriales. En el rubro Participación de propósito general se destinan recursos para agua potable y saneamiento básico, con los cuales al municipio le corresponde promover, financiar o cofinanciar proyectos de descontaminación de corrientes afectados por vertimientos, así como programas de disposición, eliminación y reciclaje de residuos líquidos y sólidos, entre otros programas.

Conpes 3146 de 2001, Estrategia para consolidar la ejecución del Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres en el corto y mediano plazo. Contiene las acciones a desarrollar en el tema de prevención de desastres, durante el período 2002 – 2004. Prioriza el fortalecimiento de las acciones que se adelantan sobre evaluación de uso eficiente y ahorro de agua para consumo humano en el país, haciendo particular énfasis en el apoyo a los territorios en la elaboración de planes de contingencia para disminuir el riesgo en caso de déficit o contaminación de aguas.

Conpes 3164 de 2002, Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia

Plan de Acción 2002 – 2004. Identifica las acciones prioritarias, actores institucionales responsables de su ejecución, recursos financieros requeridos y mecanismos de coordinación necesarios para la implementación de esta Política. Establece las actividades del programa nacional para la evaluación, prevención, reducción y control de la contaminación generada por fuentes terrestres y marinas.

Conpes 3177 de 2002, Acciones Prioritarias y Lineamientos para la Formulación del Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales (PMAR): Define las acciones prioritarias y los lineamientos para la formulación del Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales (PMAR) con el fin de promover el mejoramiento de la calidad del recurso hídrico de la Nación. Este documento establece cinco acciones prioritarias enmarcadas en la necesidad de priorizar la gestión, desarrollar estrategias de gestión regional, revisar y actualizar la normatividad del sector, articular las fuentes de financiación y fortalecer una estrategia institucional para la implementación del Plan Nacional de Manejo de aguas Residuales.

Ley 812 de 2003, Ley del Plan Nacional de Desarrollo 2002 –2006: Hacia un Estado Comunitario. Establece en el objetivo de impulsar el crecimiento económico sostenible, estrategia de sostenibilidad ambiental, y como acción prioritaria del programa Manejo

Integral del Agua, la prevención y control de la contaminación a través de la formulación e implementación del Plan de manejo de aguas residuales según los lineamientos del Conpes 3177.

Decreto 1180 de 2003: Reglamenta la Ley 99 de 1993 respecto a la Licencia Ambiental (LA). Establece los proyectos, obras y actividades sujetos a LA, las competencias de las autoridades ambientales, y el procedimiento para el otorgamiento de la LA. Define que, para la construcción y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, que sirvan poblaciones iguales o superiores a 200.000 habitantes, se requiere licencia ambiental otorgada por la Autoridad Ambiental.

Lineamientos de la Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros – LPNOEC.

Decreto 2811 de 1974: Denominado Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Contiene las acciones de prevención y control de la contaminación del recurso hídrico, para garantizar la calidad del agua para su uso posterior.

Ley 9 de 1979: Conocida como Código Sanitario Nacional. Establece los procedimientos y las medidas para llevar a cabo la regulación y control de los vertimientos.

Decreto 1594 de 1984: Norma reglamentaria del Código Nacional de los Recursos Naturales y de la ley 9 de 1979, desarrolla los aspectos relacionados con el uso del agua y los residuos líquidos. En cuanto a aguas residuales, define los límites de vertimiento de las sustancias de interés sanitario y ambiental, permisos de vertimientos, tasas retributivas, métodos de análisis de laboratorio y estudios de impacto ambiental.

Ley 99 de 1993: Reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables. otorga a las autoridades ambientales Regionales, en su calidad de máxima autoridad ambiental en el área de su jurisdicción, la facultad de ejercer las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental del uso del

agua, el suelo, el aire y los demás recursos naturales renovables, las cuales comprenderán el vertimiento, emisión o incorporación de sustancias o residuos líquidos, sólidos o gaseosos, en cualquiera de sus formas, a las aguas en cualquiera de sus formas, al aire, o a los suelos, así como los vertimientos que puedan causar daño o poner en peligro el normal desarrollo sostenible de los recursos naturales renovables o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos. Entre otras, encarga a los municipios la función específica de ejecutar obras o proyectos de descontaminación de corrientes o depósitos de agua afectados por los vertimientos municipales. Además, crea la tasa retributiva por vertimientos líquidos puntuales a los cuerpos de agua y establece los lineamientos para su implementación.

Lineamientos de Política para el Manejo integral del agua. Documento aprobado por el Consejo Nacional Ambiental en 1996; su objetivo es manejar la oferta nacional del agua sosteniblemente, para atender los requerimientos sociales y económicos del desarrollo en términos de cantidad, calidad y distribución espacial y temporal. Entre otros, plantea como objetivo específico disminuir la contaminación y recuperar las condiciones de calidad de las fuentes según los usos requeridos.

Decreto 3100 de 2003: Reglamenta los artículos 42 y 43 de la ley 99 de 1993, respecto a la implementación de tasas retributivas por vertimientos líquidos puntuales a un cuerpo de agua. La tasa retributiva consiste en un cobro por la utilización directa o indirecta de las fuentes de agua como receptoras de vertimientos puntuales y por sus consecuencias nocivas para el medio ambiente. La resolución 372 de 1998 establece el monto de las tasas mínimas para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Ley 142 de 1994: Régimen de los servicios públicos domiciliarios. Establece la competencia de los municipios para asegurar la prestación eficiente del servicio domiciliario de alcantarillado, que incluye el tratamiento y disposición final de las aguas residuales.

Además, define que las entidades prestadoras de servicios públicos domiciliarios deben proteger el ambiente cuando sus actividades lo afecten (cumplir con una función ecológica).

Ley 373 de 1997: Uso Eficiente y Ahorro del agua. Contribuye a la disminución de aguas residuales, y fomenta el desarrollo del rehusó de las aguas residuales como una alternativa de bajo costo que debe ser valorada.

Resolución 1096 de 2000, Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS, título E, tratamiento de aguas residuales: El RAS es el documento técnico que fija los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los proyectos del sector de agua potable y saneamiento básico. En el caso de sistemas de tratamiento de aguas residuales, el RAS tiene en cuenta los procesos involucrados en la conceptualización, diseño, construcción, supervisión técnica, puesta en marcha, operación y mantenimiento.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Tipo de investigación

Para el desarrollo de este proyecto se llevará a cabo una investigación de profundidad descriptiva teniendo en cuenta que se determinara el Análisis y simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto, mediante estudios previos basados en el estado del arte, bajo un diseño de investigación documental dado a que se realizaran cálculos matemáticos y análisis en software específicos de la carrera como OpenFOAM que soportaran la investigación, siendo de esta forma un proyecto de propósito básico. Finalmente tendrá un enfoque Cualitativo porque se tendrán en cuenta las variables que influyen en el diseño geométrico para los posteriores cálculos respectivos.

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad el Análisis y simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto en Ocaña Norte de Santander.

Según (RIVAS, 1995.) “trata de obtener información acerca del fenómeno o proceso, para describir sus implicaciones” (p.54). Este tipo de investigación, no se ocupa de la verificación de la hipótesis, sino de la descripción de hechos a partir de un criterio o modelo teórico definido previamente, lo cual nos permitió realizar la simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. En cuanto al diseño de investigación, (Arias fidias, 2006) lo define como:

” La estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado” (p. 26). Así mismo considera que la investigación de campo es aquella que consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad

donde ocurren los hechos (datos primarios) sin manipular o controlar variable alguna, es decir, el investigador obtiene la información, pero no altera las condiciones existentes (p.31).

Por tanto, para el desarrollo de este estudio el diseño de la investigación fue de campo e investigativa porque la información fue recolectada a través de la fuente primaria, que para este caso sería el Análisis y simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto, los cuales permitieron la realización del diagnóstico, por medio de la aplicación de los relativos indicadores.

3.2 Población

Afirma (Arias, 2006). La población para la realización del estudio estará conformada por el Análisis y simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto en Ocaña Norte de Santander. En la Que la población "...es el conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. (p.81)

3.3 Muestra

Por ser tan pequeña la muestra no necesita formula estadística.

(García., 2002); Define la muestra como "...la unidad seleccionada de la población para la aplicación de la técnica de investigación. Puede ser un elemento o un conjunto de elementos. (p.65)

3.4 Técnicas de recolección de información

Sostiene que según nivel de conocimiento científico al que se espera llegar, se debe formular el tipo de técnicas e instrumentos de recolección de información que se va a utilizar para obtener información, cuyo propósito es señalar el tipo de información que se necesita, así como el nivel de análisis que deberá realizar, para lo cual debe tenerse en cuenta los objetivos que se plantearon (Méndez A C, 2003) (P.21).

Para la recolección de la información se utilizó técnicas como:

Se toma como base el concepto de las fuentes de recolección de información, y se guiará por medio de las consultas directas, para el Análisis y simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto en Ocaña Norte de Santander.

Técnica de recolección primaria. Para la recolección de datos se recolectará la información bibliográfica el Análisis y simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto, Calcular los elementos constitutivos mediante teorías de diseño mecánico, con la ayuda del Software la cual se obtendrá información para el adecuado desarrollo del estudio dando paso a la planeación y ejecución de las acciones.

3.5 Análisis de la información

De acuerdo con la información obtenida mediante los medios bibliográficos, y la ayuda del Software OpenFOAM se analizará de manera cualitativa, con el fin de determinar el Análisis y simulación mediante el software de openfoam del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto en Ocaña Norte de Santander.

Capítulo 4. Administración del proyecto

4.1 Recursos humanos

El presente estudio será realizado por los estudiantes: MANUEL GEOVANY ARÉVALO SILVA Y ABEL MAURICIO CÁRDENAS CHINCHILLA. Estudiante de Ingeniería Mecánica. Dirigido por el Ingeniero Mecánico PEDRO JULIÁN GARCÍA GUARÍN. Profesor catedrático de la U.F.P.S.O

4.2 Recursos institucionales

Biblioteca Argemiro Bayona Portillo de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Universidad Francisco de Paula Santander, seccional Ocaña.

4.3 Recursos financieros

Los gastos en la elaboración del proyecto serán cubiertos por los mismos autores.

INGRESOS		
MANUEL AREVALO	\$500.000	
ABEL CARDENAS	\$500.000	
TOTAL, INGRESOS		\$ 1.000.000
EGRESOS		
Trasporte	\$ 100.000	
Digitación e impresión	\$ 300.000	
Papelería y fotocopias	\$ 200.000	
Internet	\$ 100.000	
Gastos varios	\$ 300.000	
TOTAL, EGRESOS		\$ 1.000.000
SUMAS IGUALES	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5. Presentación de resultados

5.1 Generar condiciones del flujo laminar en un canal abierto para determinar el campo de velocidades y presiones del canal.

Un canal abierto es un sistema que se encuentra en contacto con la atmósfera, también se dan en medios naturales como: un río, un arroyo, inundaciones y en medios artificiales o los creados por el hombre como: las canaletas, alcantarillas y vertederos.

También se dice que un canal abierto es un conducto por el que se desliza un líquido mediante una fuerza de gravedad ejercida sobre la masa del líquido o fluido, donde la velocidad en la superficie va a ser cero y si existe un flujo secundario entonces la velocidad mayor se da en el centro esto es por sus condiciones de no deslizamiento y si es un canal circular.

El flujo de canales abiertos tiene lugar cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad y solo están parcialmente envueltos por un contorno sólido. En el flujo de canales abiertos, el líquido que fluye tiene superficie libre y sobre él no actúa otra presión que la debida a su propio peso y a la presión atmosférica. El flujo en canales abiertos también tiene lugar en la naturaleza, como en ríos, arroyos, etc., si bien en general, con secciones rectas del cauce irregulares. De forma artificial, creadas por el hombre, tiene lugar en los canales, acequias, y canales de desagüe. En la mayoría de los casos. Los canales tienen secciones rectas regulares y suelen ser rectangulares, triangulares o trapezoidales. También tienen lugar el flujo de canales abiertos en el caso de conductos cerrados, como tuberías de sección recta circular cuando el flujo no es a conducto lleno. En los sistemas de alcantarillado no tiene lugar, por lo general, el flujo a conducto lleno, y su diseño se realiza como canal abierto.

El flujo es laminar: Un flujo laminar es el líquido que se desplaza con una suave velocidad (orden). Si las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las fuerzas

inerciales, de tal manera que la viscosidad juega con un papel muy importante en determinar el comportamiento del flujo. En el flujo laminar, las partículas de agua se mueven en trayectorias suaves definidas o en líneas de corriente, y las capas de fluido con espesor infinitesimal parecen deslizarse sobre capas adyacentes.

Análisis de la geometría del canal

Un canal con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante se conoce como canal prismático. De otra manera, el canal es no prismático; un ejemplo es un vertedero de ancho variable y alineamiento curvo. Al menos que se indique específicamente los canales descritos son prismáticos.

El trapecio es la forma más común para canales con bancas en tierra sin recubrimiento, debido a que proveen las pendientes necesarias para la estabilidad.

El rectángulo y el triángulo son casos especiales del trapecio. Debido a que el rectángulo tiene lados verticales, por lo general se utiliza para canales construidos para materiales estables, como mampostería, roca, metal o madera. La sección transversal solo se utiliza para pequeñas asqueas, cunetas o a lo largo de carreteras y trabajos de laboratorio. El círculo es la sección más común para alcantarillados y alcantarillas de tamaño pequeño y mediano. (Ven Te Chow, 2012)

Canal de pendiente variable (C.P.V): Canal construido en acrílico transparente de 8 mm de espesor que está protegido por una estructura metálica. Este canal está adosado a través de su estructura metálica de protección al tanque amortiguador.

Es a través del C.P.V. que se puede observar los fenómenos hidráulicos dados en canales abiertos. Además, este canal puede cambiar su pendiente (de 0° a 10°) a través de un mecanismo de basculación. El canal tiene un freno de seguridad o tope que sirve como guía para establecer la pendiente 0° del C.P.V.

Mecanismo de basculación: está compuesto por un tornillo y una volante que al ser manipulados otorgan al canal la pendiente requerida. Se debe tener gran precaución en no forzar el canal en pendiente contraria - no subir el C.P.V. más allá de la posición que tiene en la pendiente 0°- ya que su unión con el tanque de amortiguación se puede ver afectada generando filtraciones o la ruptura del canal.

El canal esta instrumentado con una serie de piezómetros que posteriormente se comunican a un tablero piezométrico, a través de unas mangueras transparentes, donde se puede verificar el cambio de las alturas del flujo en los puntos estudiados.



Figura 4. Canal abierto

Fuente: Laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de paula Santander Ocaña



Figura 5. Dimensiones del canal abierto

Fuente: Laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de paula Santander Ocaña



Figura 6. Mecanismo de basculación

Fuente: Laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de paula Santander Ocaña

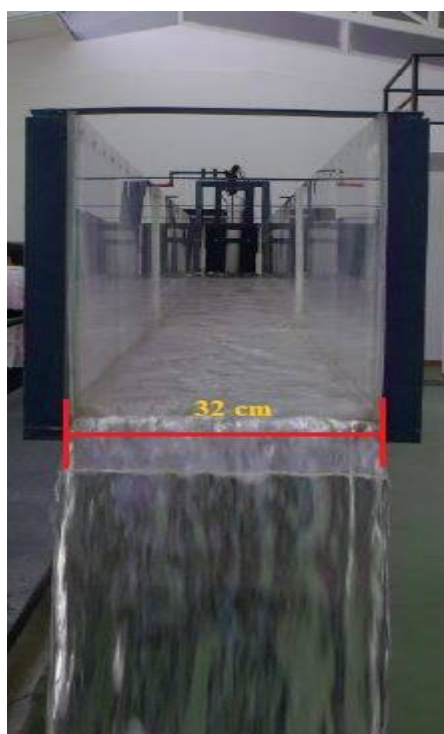


Figura 7. Dimensión interior del canal abierto

Fuente: Laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de paula Santander Ocaña

Utilización del software Salome

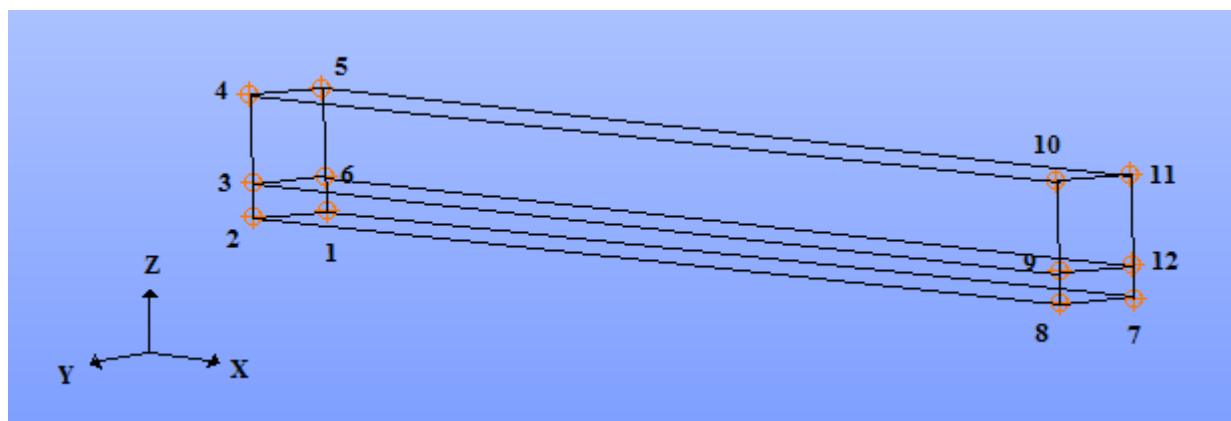


Figura 8. Creación de puntos en coordenadas cartesianas

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la ubicación de todos los puntos de la geometría correspondiente al canal abierto en coordenadas cartesianas de los ejes x, y, z en el software de Salome.

Tabla 2.

Coordenadas de acuerdo con cada punto

PUNTOS	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0	0	0,015
2	0	0,32	0,015
3	0	0,32	0,146
4	0	0,32	0,495
5	0	0	0,495
6	0	0	0,146
7	6,98	0	0
8	6,98	0,32	0
9	6,98	0,32	0,131
10	6,98	0,32	0,48
11	6,98	0	0,48
12	6,98	0	0,131

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se aprecian los valores de cada uno de los puntos reflejados en la figura 8. Con respecto a los ejes x, y, z.

Características de las condiciones de frontera en la malla

atmosphere → atmosfera

inlet → entrada del fluido

outlet → salida del fluido

fixedWalls → paredes fijas

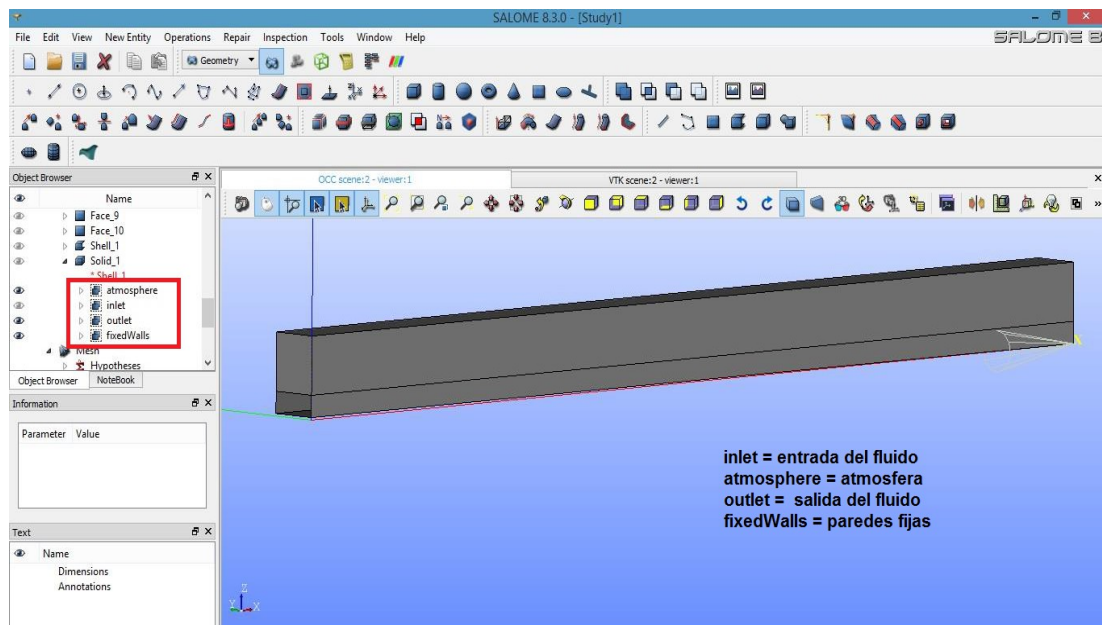


Figura 9. Geometría de canal abierto en salome

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se muestra la geometría del canal abierto finalizado con sus respectivas condiciones iniciales en el software de salome.

Tipo de malla

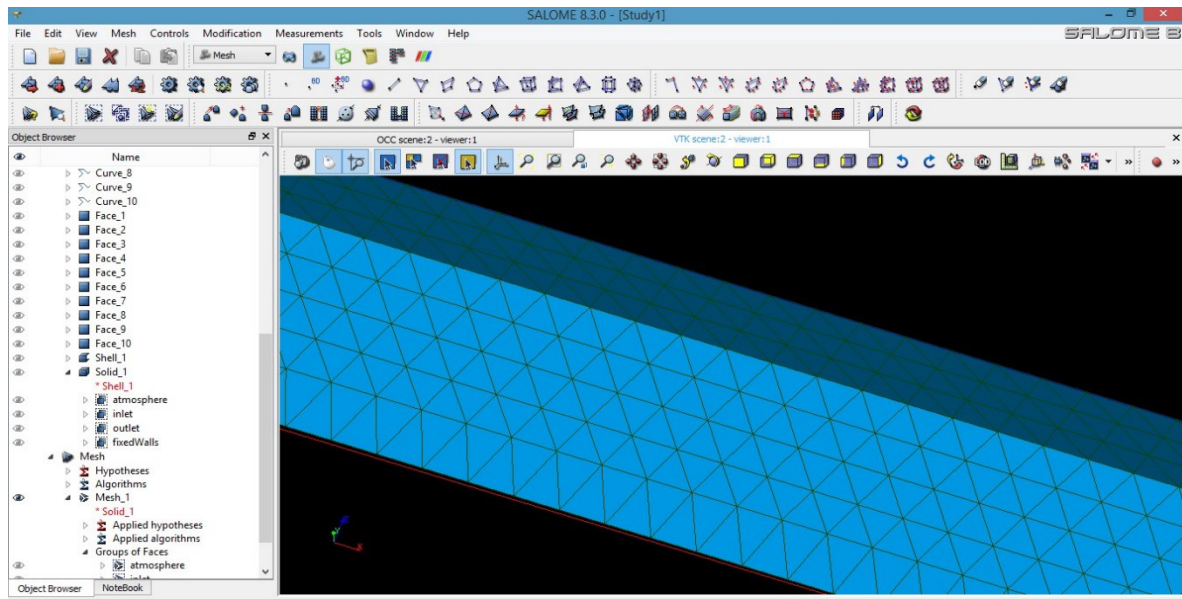


Figura 10. Malla tetrahedrons

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se logra apreciar el mallado de la geometría del canal abierto de tipo Tetrahedrons en el software de salome, la cual cuenta con un valor de 7800 elementos.

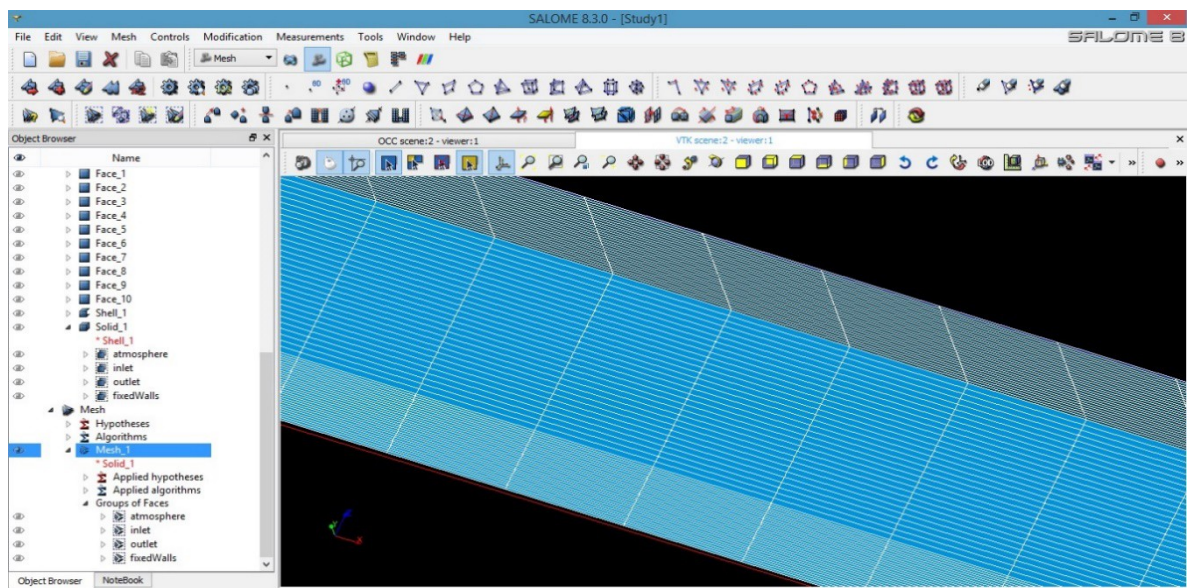


Figura 11. Malla hexahedrons

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se logra apreciar el mallado de la geometría del canal abierto de tipo Hexahedrons en el software de salome, la cual cuenta con un valor de 54000 elementos.

Utilización del software Paraview

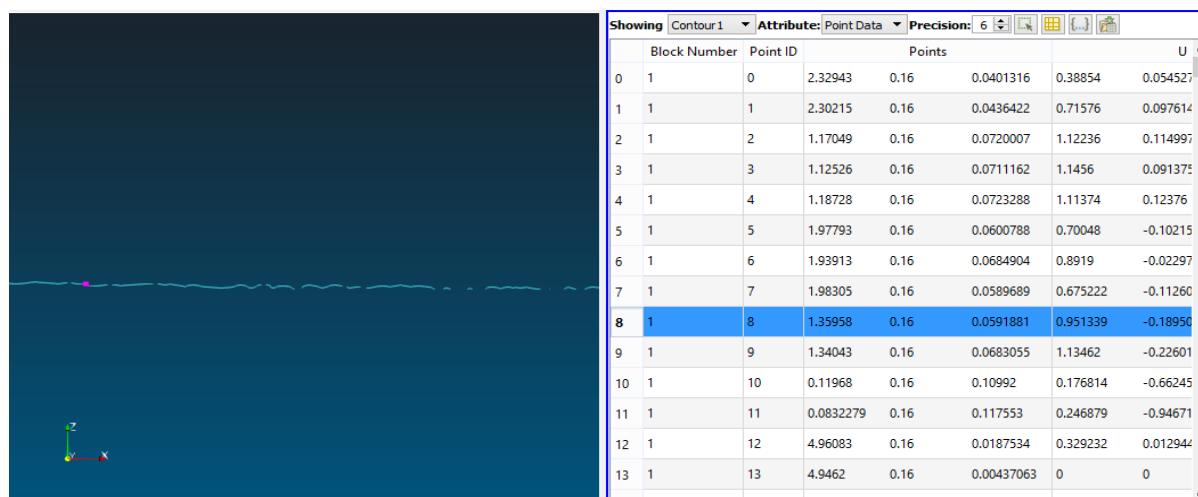


Figura 12. Datos de la malla tetrahedrons

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa que el movimiento del flujo es ordenado indicando que se trabajó con un flujo laminar y se logran apreciar los valores correspondientes a la velocidad y presiones en un punto seleccionado en la malla Tetrahedrons.

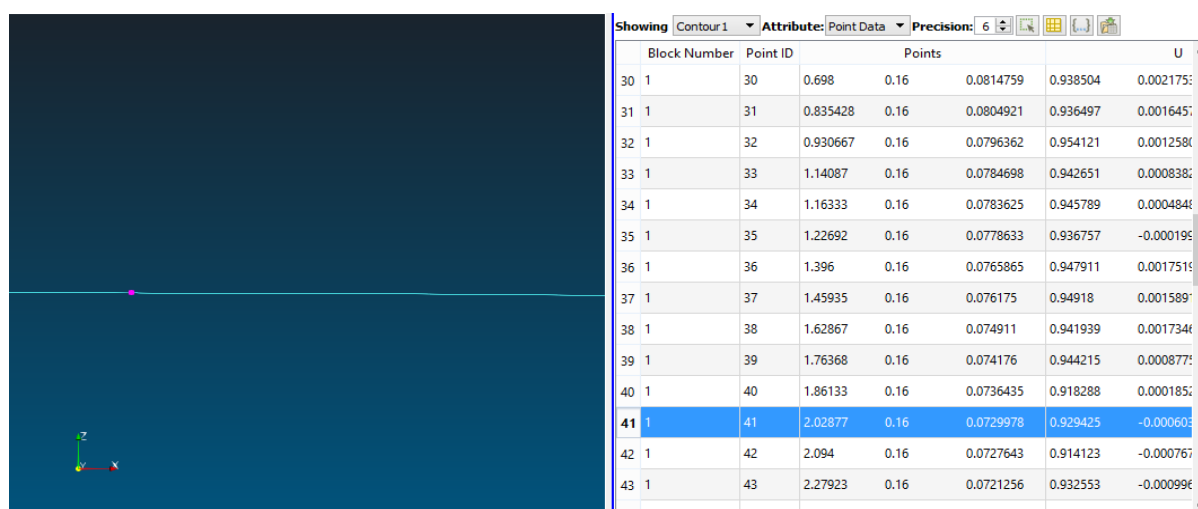


Figura 13. Datos de la malla hexahedrons

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa que el movimiento del flujo es ordenado indicando que se trabajó con un flujo laminar y se logran apreciar los valores correspondientes a la velocidad y presiones en un punto seleccionado en la malla Hexahedrons.

5.2 Implementar el código necesario en OpenFOAM para estimar el campo de velocidades y presiones en un canal abierto.

Los datos diligenciados a continuación son los valores iniciales, de los cuales el programa genera las condiciones finales; dichos valores sirven de análisis para los datos de la velocidad y la presión.

Condiciones iniciales para la velocidad

```

/*-----* C++ *-----*\
|=====|
|\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|\ / Operation | Version: 4.1 |
|\ / And | Web: www.OpenFOAM.org |
|\ / Manipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
  version 2.0;
  format ascii;
  class volVectorField;
  location "0";
  object U;
}
// *****

dimensions [0 1 -1 0 0 0];

internalField uniform (0 0 0);

boundaryField
{
  inlet
  {
    type fixedValue;
    value uniform (0.586936 0 0);
  }
  outlet
  {

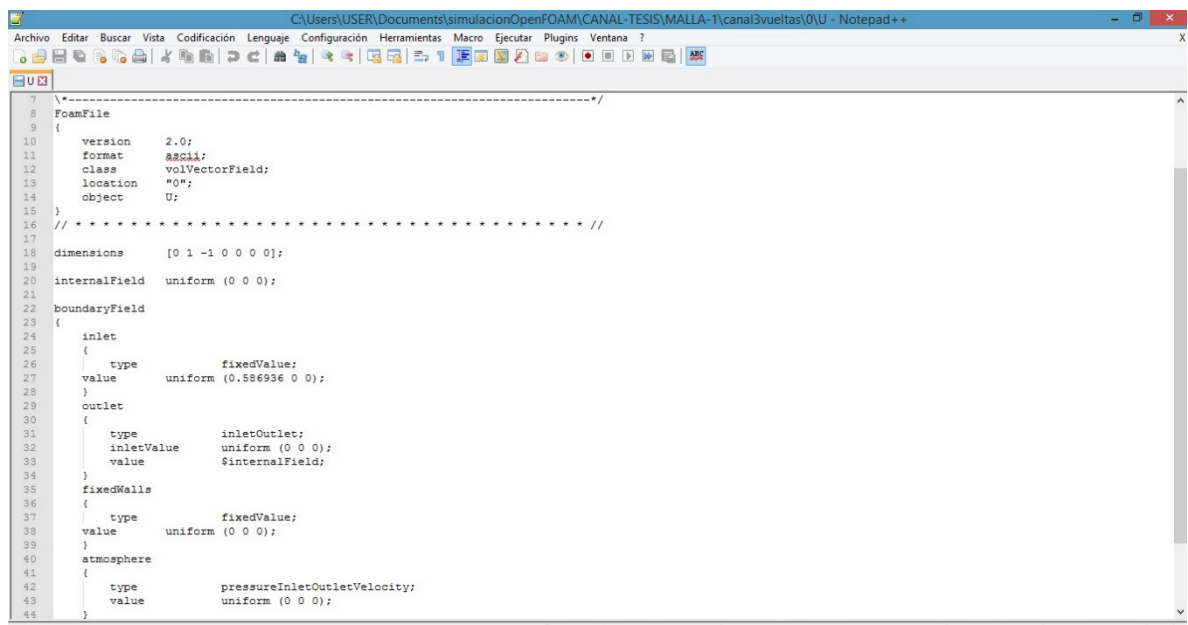
```

```

        type      inletOutlet;
    inletValue    uniform (0 0 0);
    value         $internalField;
}
fixedWalls
{
    type      fixedValue;
value        uniform (0 0 0);
}
atmosphere
{
    type      pressureInletOutletVelocity;
    value     uniform (0 0 0);
}
}

//
***** //

```



```

7  \*-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format       $ascii;
12     class        volVectorField;
13     location     "0";
14     object       U;
15 }
16 // ***** //
17
18 dimensions      [0 1 -1 0 0 0];
19
20 internalField    uniform (0 0 0);
21
22 boundaryField
23 {
24     inlet
25     {
26         type      fixedValue;
27         value     uniform (0.586936 0 0);
28     }
29     outlet
30     {
31         type      inletOutlet;
32         inletValue    uniform (0 0 0);
33         value         $internalField;
34     }
35     fixedWalls
36     {
37         type      fixedValue;
38         value     uniform (0 0 0);
39     }
40     atmosphere
41     {
42         type      pressureInletOutletVelocity;
43         value     uniform (0 0 0);
44     }
45 }

```

Figura 14. Condiciones iniciales para la velocidad

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se logra apreciar un breve esquema de la programación sobre la estructura de las condiciones iniciales y las dimensiones requeridas para el valor de la velocidad en un canal abierto.

Limitaciones de los campos con respecto a la presión

```

/*-----* C++ *-----*\
|=====| | |
|\ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|\ \ / O p e r a t i o n | Version: 4.1 |
|\ \ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
|\ \ M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class volScalarField;
    object p_rgh;
}
// ***** //

dimensions [1 -1 -2 0 0 0];

internalField uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type zeroGradient;
    }

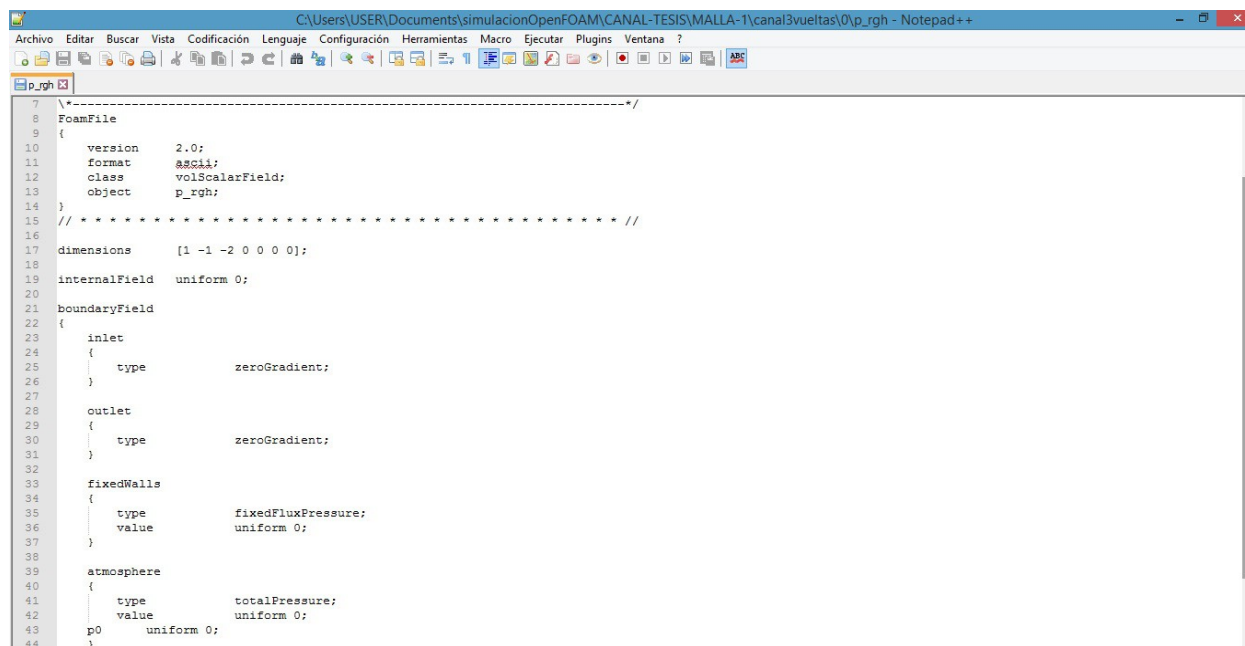
    outlet
    {
        type zeroGradient;
    }

    fixedWalls
    {
        type fixedFluxPressure;
        value uniform 0;
    }

    atmosphere
    {
        type totalPressure;
        value uniform 0;
    }
    p0 uniform 0;
}

```

```
//
***** //
```



```

7 \-----/
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        volScalarField;
13     object       p_rgh;
14 }
15 // ***** //
16 dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];
17
18 internalField    uniform 0;
19
20 boundaryField
21 {
22     inlet
23     {
24         type      zeroGradient;
25     }
26
27     outlet
28     {
29         type      zeroGradient;
30     }
31
32     fixedWalls
33     {
34         type      fixedFluxPressure;
35         value     uniform 0;
36     }
37
38     atmosphere
39     {
40         type      totalPressure;
41         value     uniform 0;
42     }
43     p0            uniform 0;
44 }

```

Figura 15. Limitaciones de los campos con respecto a la presión

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se logra apreciar un breve esquema de la programación sobre las limitaciones del campo con respecto a la presión generada por el solucionador y las dimensiones requeridas para el valor de la presión.

Condiciones iniciales para el agua en cada frontera

```

/*-----* C++ *-----*\
|=====|
|\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|\ / Operation | Version: v1706 |
|\ / And | Web: www.OpenFOAM.com |
|\ / Manipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;

```



```

    location "0";
    object  alpha.water;
}
// ***** //

dimensions  [0 0 0 0 0 0];

internalField  uniform 0;

boundaryField
{
    atmosphere
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue  uniform 0;
        value      uniform 0;
    }
    inlet
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue  uniform 1;
        value      uniform 1;
    }
    outlet
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue  uniform 0;
        value      uniform 0;
    }
    fixedWalls
    {
        type      zeroGradient;
    }
}

//
***** //

```

```

C:\Users\USER\Documents\simulacionOpenFOAM\CANAL-TESIS\MALLA-1\canal3vueltas\0\alpha.water - Notepad++
Archivo  Editar  Buscar  Vista  Codificación  Lenguaje  Configuración  Herramientas  Macro  Ejecutar  Plugins  Ventana  ?
alpha.water [3]
12 {
13   version      2.0;
14   format       ascii;
15   class        volScalarField;
16   location     "0";
17   object       alpha.water;
18 }
19 // ***** //
20 dimensions    [0 0 0 0 0 0];
21
22 internalField  uniform 0;
23
24 boundaryField
25 {
26   {
27     atmosphere
28     {
29       type            inletOutlet;
30       inletValue      uniform 0;
31       value            uniform 0;
32     }
33     inlet
34     {
35       type            inletOutlet;
36       inletValue      uniform 1;
37       value            uniform 1;
38     }
39     outlet
40     {
41       type            inletOutlet;
42       inletValue      uniform 0;
43       value            uniform 0;
44     }
45     fixedWalls
46     {
47       type            zeroGradient;
48     }
49 }

```

Figura 16. Condiciones iniciales para el agua en cada frontera

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se logra apreciar un breve esquema de la programación sobre las condiciones iniciales para el agua en cada frontera indicando por donde puede o no salir el fluido.

Condiciones iniciales para la gravedad

```

/*-----* C++ -*-----*\
|=====|
|\  / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|\  / O peration | Version: 4.1 |
| \ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ M anipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
  version 2.0;
  format  ascii;
  class   uniformDimensionedVectorField;
  location "constant";
  object  g;
}
// ***** //

dimensions [0 1 -2 0 0 0];

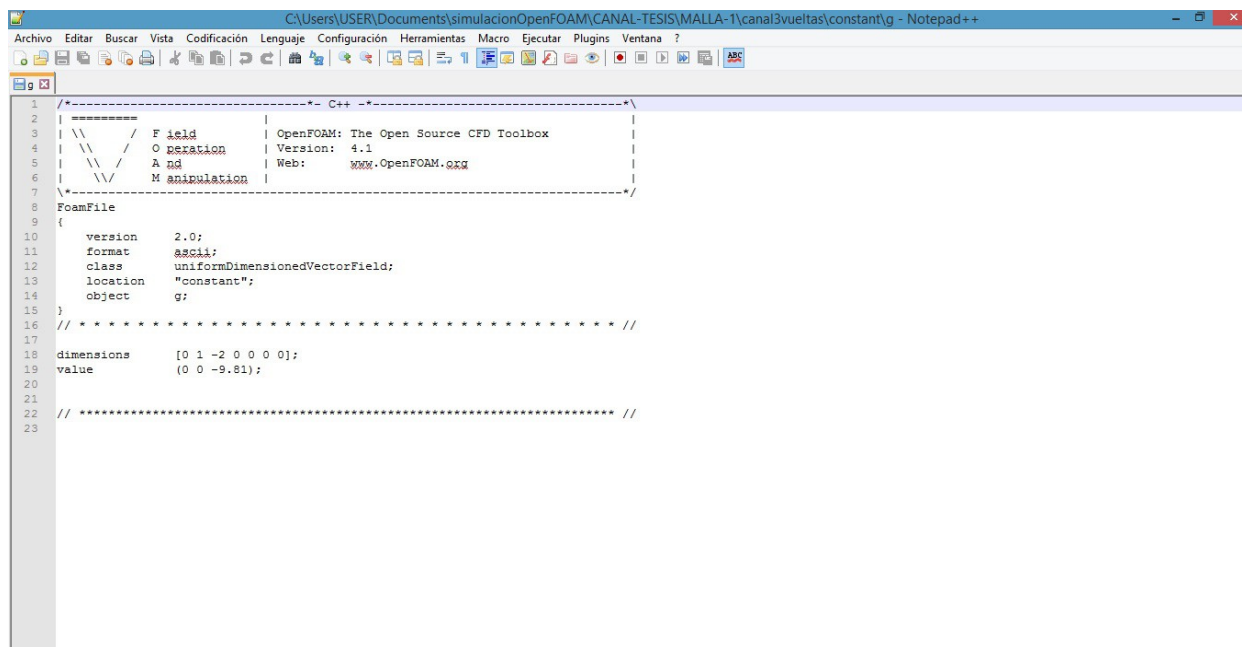
```

```

value      (0 0 -9.81);

//
***** //

```



```

1  /----- C++ -----\
2  |=====|
3  | \ / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
4  | \ / O p e r a t i o n | Version: 4.1 |
5  | \ / A n d          | Web: www.OpenFOAM.org |
6  | \ / M a n i p u l a t i o n | |
7  |-----\
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        uniformDimensionedVectorField;
13     location     "constant";
14     object       g;
15 }
16 // ***** //
17
18 dimensions      [0 1 -2 0 0 0];
19 value           (0 0 -9.81);
20
21 // ***** //
22
23

```

Figura 17. Condiciones iniciales para la gravedad

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se aprecia la programación con respecto a las condiciones iniciales y las dimensiones requeridas para el valor de la gravedad en un canal abierto.

Propiedades de transporte

```

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
| \ / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ / O p e r a t i o n | Version: 4.1 |
| \ / A n d          | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;

```

```

location "constant";
object transportProperties;
}
// ***** //

phases (water air);

water
{
transportModel Newtonian;
nu [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-06;
rho [1 -3 0 0 0 0 0] 1000;
}

air
{
transportModel Newtonian;
nu [0 2 -1 0 0 0 0] 1.48e-05;
rho [1 -3 0 0 0 0 0] 1;
}

sigma [1 0 -2 0 0 0 0] 0.07;

//
***** //

```

```

C:\Users\USER\Documents\simulacionOpenFOAM\CANAL-TESIS\MALLA-1\canal3vueltas\constant\transportProperties - Notepad++
Archivo  Editar  Buscar  Vista  Codificación  Lenguaje  Configuración  Herramientas  Macro  Ejecutar  Plugins  Ventana  ?
transportProperties
-----
Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Operation  | Version:  4.1
And        | Web:      www.OpenFOAM.org
Manipulation
-----
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "constant";
  object       transportProperties;
}
// ***** //
phases (water air);
water
{
  transportModel Newtonian;
  nu [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-06;
  rho [1 -3 0 0 0 0 0] 1000;
}
air
{
  transportModel Newtonian;
  nu [0 2 -1 0 0 0 0] 1.48e-05;
  rho [1 -3 0 0 0 0 0] 1;
}
sigma [1 0 -2 0 0 0 0] 0.07;
// ***** //

```

Figura 18. Propiedades de transporte

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observan las propiedades de transporte para la viscosidad cinemática y densidad presente en el canal abierto.

Condiciones de la malla

```

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|                                     |
|\ \ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|\ \ / O peration | Version: 4.1 |
|\ \ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
|\ \ M anipulation | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "constant";
    object dynamicMeshDict;
}
// ***** //

dynamicFvMesh staticFvMesh;

//
***** //

```

Figura 19. Condiciones de la malla

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la programación sobre las condiciones de la malla donde se aclara que se trabaja en una malla estática lo cual indica que esta no tiene movimiento alguno.

Condiciones de propiedades del flujo

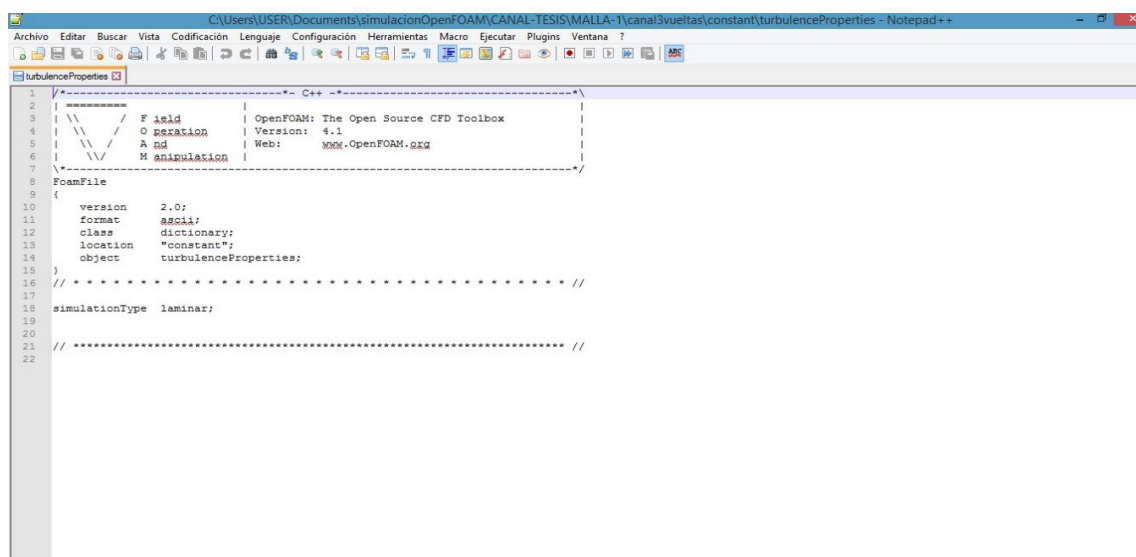
```

/*----- C++ -----*\
|=====|                                     |
| \ \ / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / O p e r a t i o n | Version: 4.1 |
| \ \ / A n d      | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ M a n i p u l a t i o n |                                     |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "constant";
    object turbulenceProperties;
}
// ***** //

simulationType laminar;

//
***** //

```



The screenshot shows a Notepad++ window titled 'C:\Users\USER\Documents\simulacionOpenFOAM\CANAL-TEJIS\MALLA-1\canal3vueltas\constant\turbulenceProperties - Notepad++'. The window displays the same code as shown in the previous block, with line numbers 1 through 22 visible on the left margin. The code defines the simulation type as laminar and includes a header for OpenFOAM.

Figura 20. Condiciones de propiedades del flujo

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se aprecia la programación de las propiedades del flujo donde se aclara que el flujo que circula por el canal abierto es un flujo de tipo laminar.

Tabla 3.

Condiciones de frontera para la velocidad de 3 vueltas

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO

CONDICIONES DE FRONTERA PARA VELOCIDAD 3 VUELTAS

	NOMBRE			
	atmosphere	inlet	outlet	fixedWalls
Tipo	patch	patch	patch	patch
Tipo para p_rgh	totalPressure	zeroGradient	zeroGradient	fixedFluxPressure
valor de p_rgh	uniform 0			uniform 0
Tipo para U	pressureInletOutletVelocity	fixedValue	inletOutlet	fixedValue
Valor para U	uniform (0 0 0)	uniforme (0,586936 0 0)	internalField	uniform (0 0 0)
Tipo para alpha.water	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet	zeroGradient
Valor de alpha.water	0	1	0	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se agruparon los valores correspondientes a las condiciones de frontera para la velocidad de 3 vueltas con respecto a la presión del solucionador, la velocidad y el alpha-water.

Tabla 4.
Condiciones de frontera para la velocidad de 4 vueltas

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO				
CONDICIONES DE FRONTERA PARA VELOCIDAD 4 VUELTAS				
	NOMBRE			
Tipo	atmosphere patch	inlet patch	outlet patch	fixedWalls patch
Tipo para p_rgh	totalPressure	zeroGradient	zeroGradient	fixedFluxPressure
valor de p_rgh	uniform 0			uniform 0
Tipo para U	pressureInletOutletVelocity	fixedValue	inletOutlet	fixedValue
Valor para U	uniform (0 0 0)	uniforme (0,691225 0 0)	internalField	uniform (0 0 0)
Tipo para alpha.water	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet	zeroGradient
Valor de alpha.water	0	1	0	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se agruparon los valores correspondientes a las condiciones de frontera para la velocidad de 4 vueltas con respecto a la presión del solucionador, la velocidad y el alpha-water.

Tabla 5.
Condiciones de frontera para la velocidad de 5 vueltas

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO				
CONDICIONES DE FRONTERA PARA VELOCIDAD 5 VUELTAS				
	NOMBRE			
Tipo	Atmosphere Patch	inlet patch	outlet patch	fixedWalls patch
Tipo para p_rgh	totalPressure	zeroGradient	zeroGradient	fixedFluxPressure
valor de p_rgh	uniform 0			uniform 0
Tipo para U	pressureInletOutletVelocity	fixedValue	inletOutlet	fixedValue
Valor para U	uniform (0 0 0)	uniforme (0,7042 0 0)	internalField	uniform (0 0 0)
Tipo para alpha.water	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet	zeroGradient
Valor de alpha.water	0	1	0	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se agruparon los valores correspondientes a las condiciones de frontera para la velocidad de 5 vueltas con respecto a la presión del solucionador, la velocidad y el alpha-water.

Definición de intervalos de tiempo y tiempo de toma de datos en el software de openfoam

```

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|\ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|\ \ / O p e r a t i o n | Version: 4.1 |
|\ \ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
|\ \ M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "system";
    object controlDict;
}
// *****

application interFoam;

startFrom startTime;

startTime 0;

stopAt endTime;

endTime 10;

deltaT 0.1;

writeControl adjustableRunTime;

writeInterval 0.05;

purgeWrite 0;

writeFormat ascii;

writePrecision 6;

```

```

writeCompression uncompressed;

timeFormat    general;

timePrecision 6;

runTimeModifiable yes;

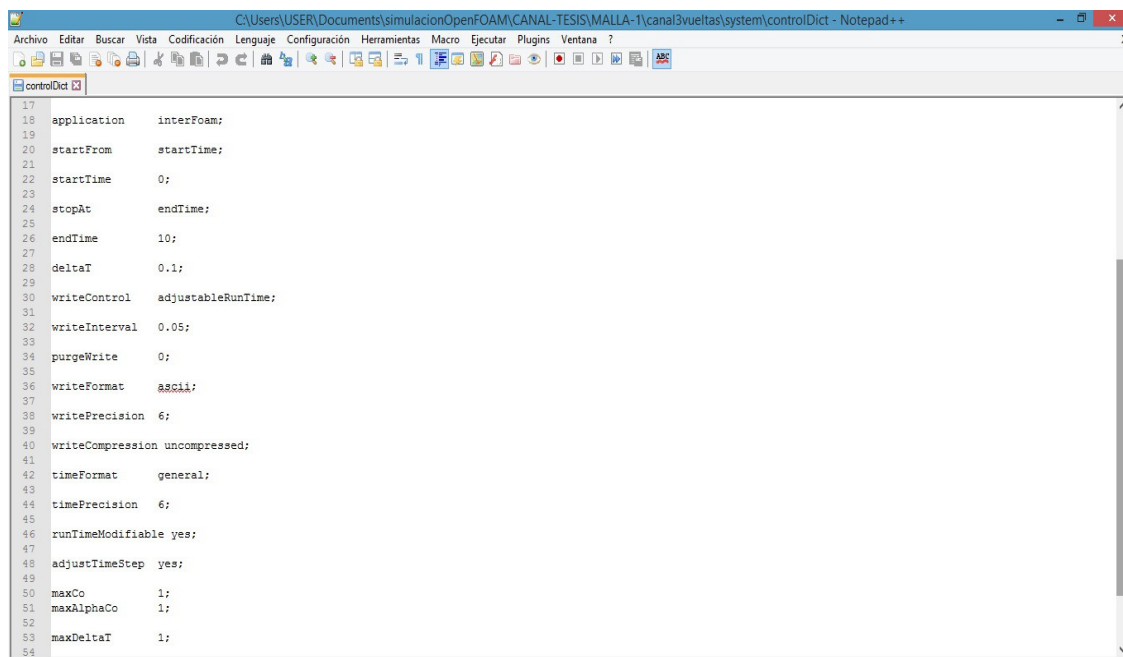
adjustTimeStep yes;

maxCo         1;
maxAlphaCo    1;

maxDeltaT     1;

//
***** //

```



```

17
18 application    interFoam;
19
20 startFrom      startTime;
21
22 startTime      0;
23
24 stopAt         endTime;
25
26 endTime        10;
27
28 deltaT         0.1;
29
30 writeControl   adjustableRunTime;
31
32 writeInterval  0.05;
33
34 purgeWrite     0;
35
36 writeFormat    ascii;
37
38 writePrecision 6;
39
40 writeCompression uncompressed;
41
42 timeFormat     general;
43
44 timePrecision  6;
45
46 runTimeModifiable yes;
47
48 adjustTimeStep yes;
49
50 maxCo          1;
51 maxAlphaCo     1;
52
53 maxDeltaT      1;
54

```

Figura 21. Definición de intervalos de tiempo y tiempo de toma de datos en el software de openfoam

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa un breve esquema de la programación donde se define la duración de la simulación, los diferentes intervalos de tiempo y el tiempo de la toma de datos en el software de openfoam.

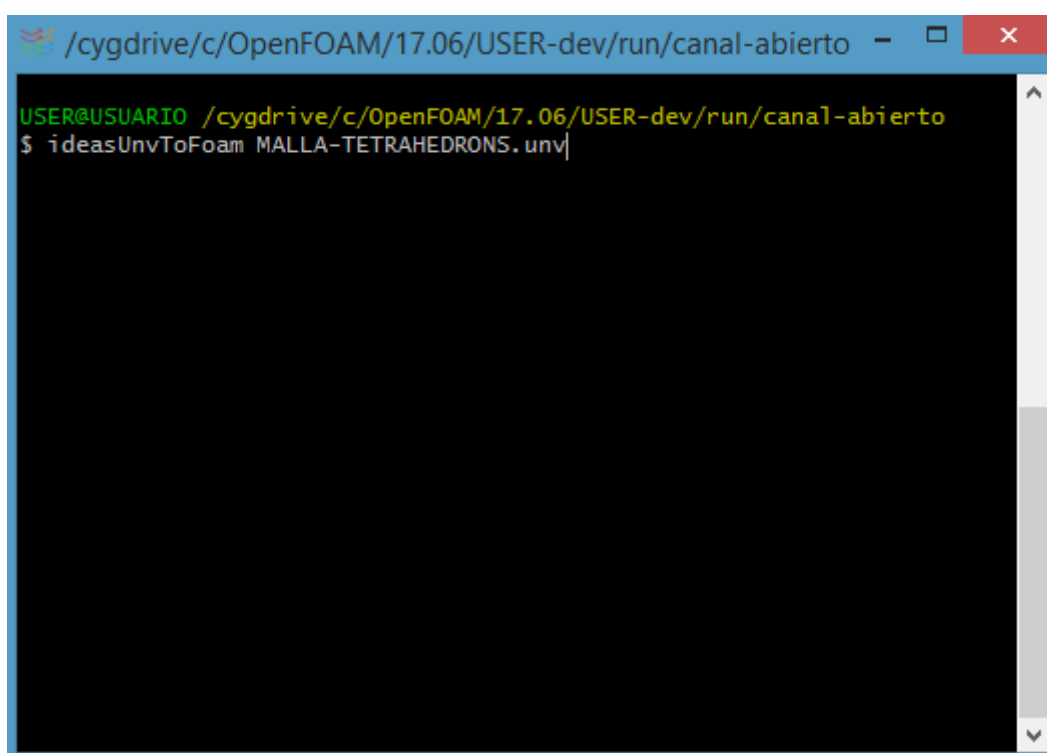
Procedimiento de la implementación de códigos en el software Openfoam

Se Ejecuta el software de openfoam en Windows

Se busca la ubicación de la carpeta contenedora de la estructura del caso de canal abierto propuesto en la computadora.

Códigos:

1. IdeasUnvToFoam

A screenshot of a terminal window with a blue title bar. The title bar text is "/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto". The terminal content shows a prompt "USER@USUARIO" followed by the path "/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto" and the command "\$ ideasUnvToFoam MALLA-TETRAHEDRONS.unv".

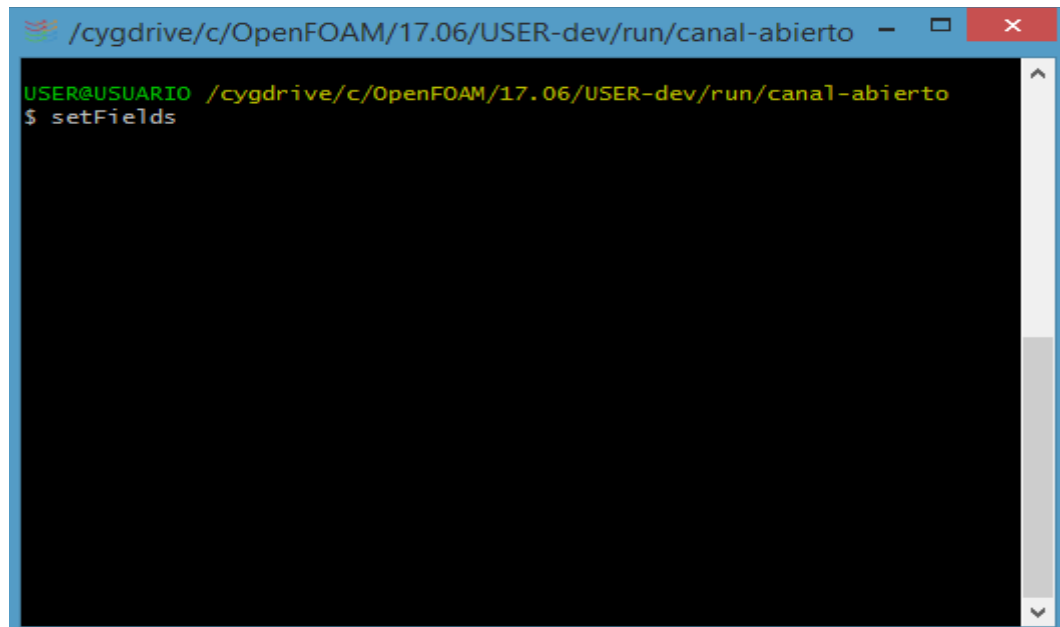
```
/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
USER@USUARIO /cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
$ ideasUnvToFoam MALLA-TETRAHEDRONS.unv
```

Figura 22. Código de ideasUnvToFoam

Fuente: Elaboración propia.

Código de ideasUnvToFoam seguido del nombre que tenga la malla en este caso MALLA-TETRAHEDRONS.unv para transferir del formato unv generada en el Software de salome al formato de foam con el fin de crear dentro de la carpeta constant una nueva carpeta llamada polyMesh la cual contiene la malla con las condiciones diseñadas.

2. setFields

A terminal window with a blue title bar. The title bar text is "/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto". The terminal content shows a prompt "USER@USUARIO" followed by the path "/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto" and the command "\$ setFields".

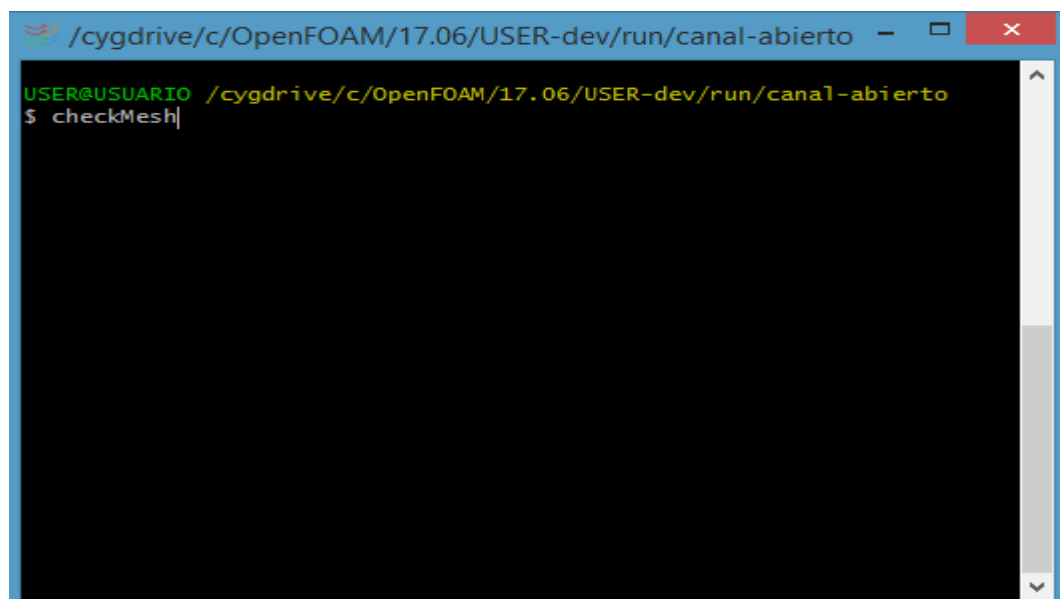
```
/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
USER@USUARIO /cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
$ setFields
```

Figura 23. Código de setField

Fuente: Elaboración propia.

Código de setFields es el encargado de la adaptación de las condiciones iniciales con las que fue programado el caso de canal abierto dentro del software de openfoam.

3. checkMesh

A terminal window with a blue title bar. The title bar text is "/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto". The terminal content shows a prompt "USER@USUARIO" followed by the path "/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto" and the command "\$ checkMesh|".

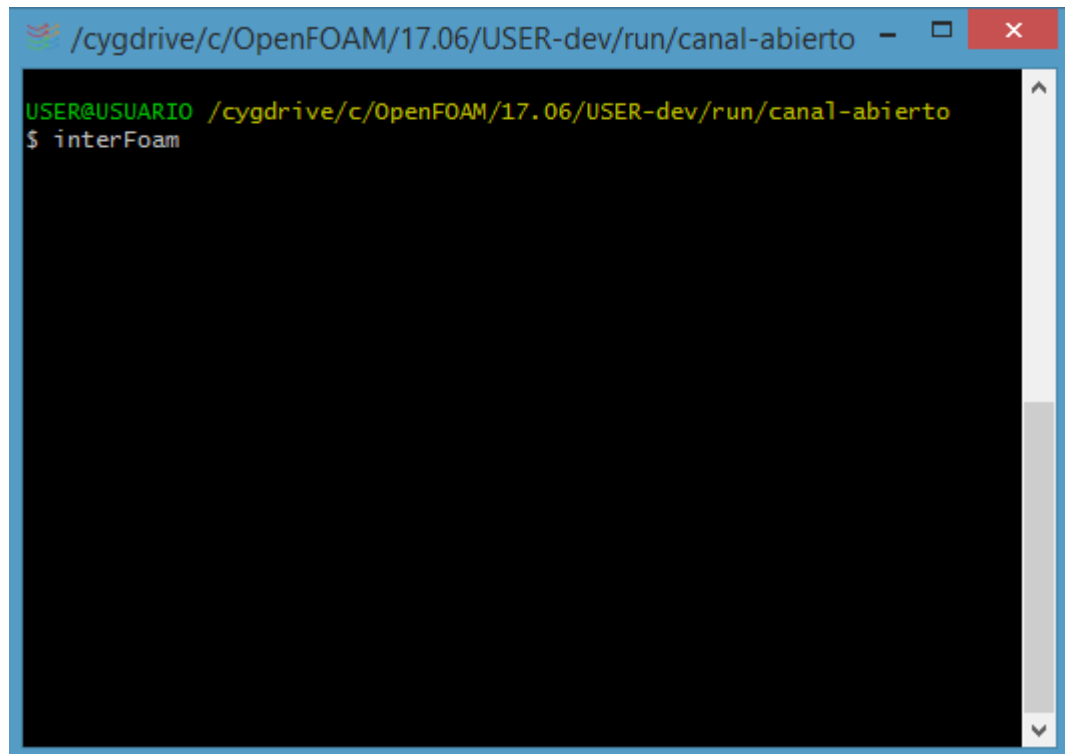
```
/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
USER@USUARIO /cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
$ checkMesh|
```

Figura 24.Código de checkMesh

Fuente: Elaboración propia.

Código de checkMesh es el encargado de hacer una verificación de la malla y constatar que no se presente error alguno en su diseño.

4. interFoam

A screenshot of a terminal window with a blue title bar. The title bar text is "/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto". The terminal content shows a green prompt "USER@USUARIO" followed by the directory path "/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto" and a white prompt "\$" followed by the command "interFoam".

```
/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
USER@USUARIO /cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
$ interFoam
```

Figura 25. Código del solucionador interFoam

Fuente: Elaboración propia.

Código del solucionador (interFoam) seleccionado según los requerimientos del caso de canal abierto multifásico de flujo laminar, este se deja correr hasta que se finalice el proceso.

5. paraFoam



```
/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
USER@USUARIO /cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
$ paraFoam  
Created temporary 'canal-abierto.foam'
```

Figura 26.Código paraFoam

Fuente: Elaboración propia.

Código de paraFoam el cual nos permite visualizar los valores obtenidos de la simulación en el software de paraView.

Visualización de la simulación en el software de paraView

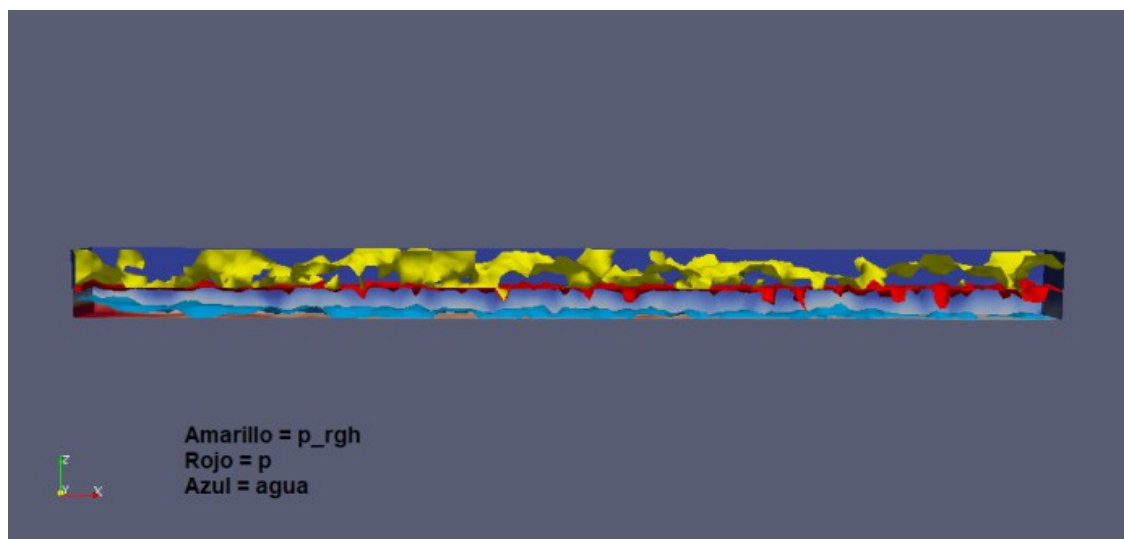


Figura 27.Malla tetrahedrons

Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se logra apreciar en la malla Tetrahedrons por medio del software de paraview el comportamiento de las presiones y del fluido dentro del canal abierto, diferenciado por medio de los colores amarillo, rojo y azul.

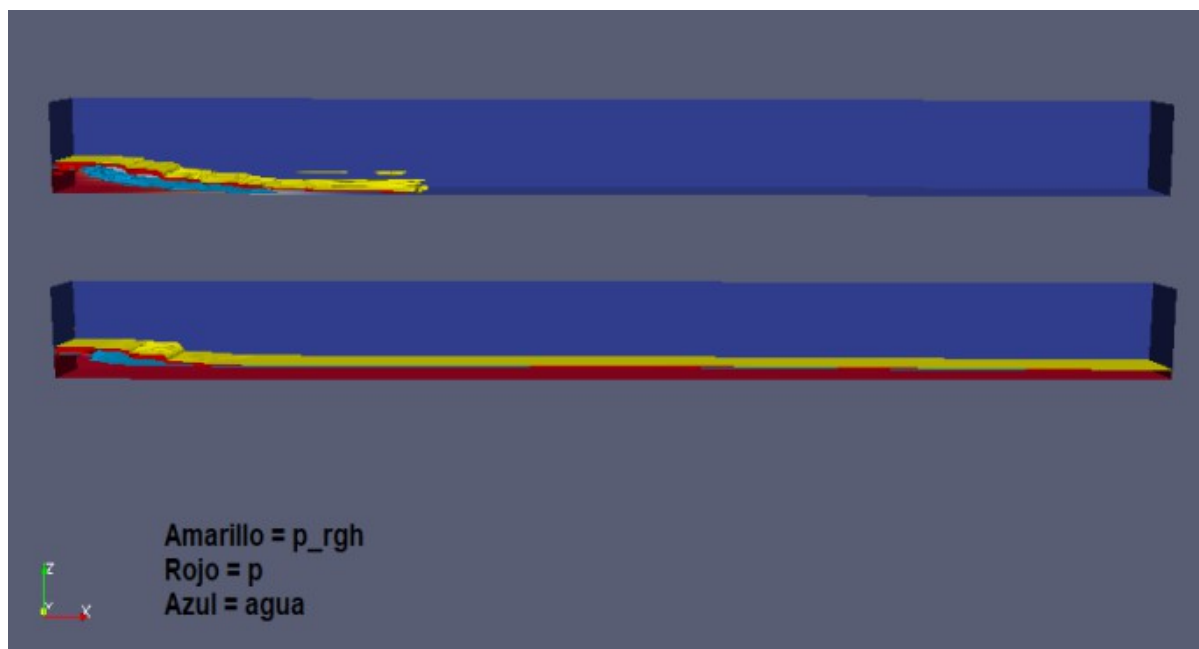


Figura 28.Malla Hectahedrons

Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se logra apreciar en la malla Hexahedrons por medio del software de paraview el comportamiento inicial y final de las presiones y del fluido dentro del canal abierto, diferenciado por medio de los colores amarillo, rojo y azul.

5.3 Calcular por medio de las ecuaciones que utiliza el software para determinar los valores de velocidades y presiones y el cambio de su interfase en el canal abierto.

Seleccionando ecuaciones gobernantes

1. Ecuación de continuidad

$$\nabla U = 0$$

Donde:

$\nabla U \rightarrow$ Gradiente de la velocidad

(Versteeg H. K. & Malalasekera, 1995)

2. Ecuación de Cantidad de movimiento

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla(U \cdot U) - \nabla \cdot (\gamma \nabla U) = -\nabla P$$

Donde:

$$\frac{\partial U}{\partial t} \rightarrow \text{Derivada temporal} \quad \therefore \quad \frac{\partial U}{\partial t} = a$$

$\nabla(U \cdot U) \rightarrow$ Termino convectivo, es un término propio de los fluidos el cual

representa el movimiento de la partícula

$\nabla \cdot (\gamma \nabla U) \rightarrow$ Termino difusivo se encarga de las propiedades de las partículas

$\nabla P \rightarrow$ Termino fuente

(Santiago Márquez, (s. f.))

3. Ecuación de Navier-Stokes

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \gamma \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_j^2} + S_i + \rho g \hat{k}$$

Donde:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} \rightarrow \text{Termino transitorio}$$

$$U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \rightarrow \text{Termino advectivo}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_i} \rightarrow \text{Cambio de presion}$$

$$\gamma \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_j^2} \rightarrow \text{Matriz}$$

$$S_i \rightarrow \text{Perdidas}$$

$$\rho g \hat{k} \rightarrow \text{Efecto de la gravedad en el fluido}$$

(Versteeg H. K. & Malalasekera W. , 1995)

4. Método de volumen de fluido (VOF)

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma U) = 0$$

Donde:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} \rightarrow \text{Derivada Local}$$

$$\nabla \cdot (\gamma U) \rightarrow \text{Termino convectivo}$$

(Santiago Márquez, (s. f.))

Demostración de cada una de las ecuaciones gobernantes

1. Ecuación de continuidad

$$\nabla U = 0 \quad \therefore \quad \rho = \text{CTE}$$

Para términos compresibles se hace fácil resolver ya que se cuenta con la ecuación de gases ideales

$$PV = mRT$$

Reduciendo la ecuación se halla:

$$P = \frac{m}{V}RT \quad (1)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Reemplazo (2) en (1) y se obtiene

$$\frac{P}{\rho} = RT \quad \therefore \quad T = \text{CTE}$$

Donde:

$\rho \rightarrow$ Densidad

$P \rightarrow$ Presion

$R \rightarrow$ Constante universal de los gases ideales

$T \rightarrow$ Temperatura

Ya que el caso propuesto a trabajar es de flujo incompresible se dificulta hallar la presión por esto se usa la ecuación de continuidad y se aplica la ecuación de conservación de masa para su demostración.

Sabiendo por conservación de masa que la masa que pasa por la superficie de entrada es igual a la masa que atraviesa la superficie de salida.

Se puede decir que:

$$\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{salida} + \frac{\partial \dot{m}}{\partial x}$$

$\dot{m}_{entrada} \rightarrow$ fluijo masico a la entrada

$\dot{m}_{salida} \rightarrow$ flujo masico a la salida

$\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} \rightarrow$ razon de cambio de la masa dentro de las fronteras

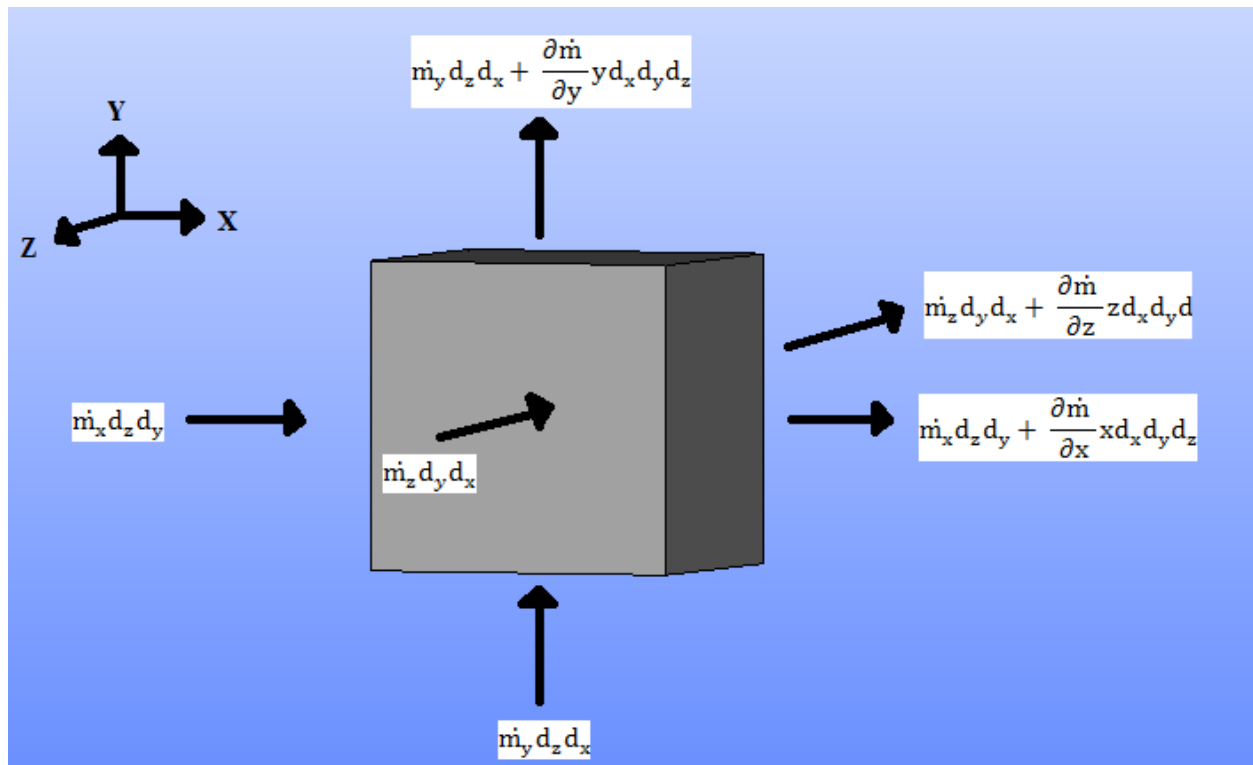


Figura 29. Análisis de conservación de masa

Fuente: Elaboración propia.

$$\dot{m}_y d_z d_x - \dot{m}_y d_z d_x + \frac{\partial \dot{m}_y}{\partial y} d_x d_y d_z + \dot{m}_z d_y d_x - \dot{m}_z d_y d_x +$$

$$\frac{\partial \dot{m}_z}{\partial z} d_x d_y d_z + \dot{m}_x d_z d_y - \dot{m}_x d_z d_y + \frac{\partial \dot{m}_x}{\partial x} d_x d_y d_z = 0$$

Simplificando la ecuación se obtiene

$$\frac{\partial \dot{m}_y}{\partial y} d_x d_y d_z + \frac{\partial \dot{m}_z}{\partial z} d_x d_y d_z + \frac{\partial \dot{m}_x}{\partial x} d_x d_y d_z = 0 \rightarrow (1)$$

Para flujo estacionario

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}}$$

Despejo \dot{m}

$$\dot{m} = \rho V \quad (2)$$

$$dV = d_x d_y d_z \quad (3)$$

Reemplazo (2) y (3) en (1)

$$\frac{\partial \rho V_y}{\partial y} dV + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} dV + \frac{\partial \rho V_x}{\partial x} dV = 0 \quad (4)$$

Como es flujo incompresible la densidad es constante y sale de la integral entonces:

$$dV \rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) = 0$$

Simplificando la ecuación

$$\left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = 0 \rightarrow (5)$$

Sabiendo que:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \rightarrow (6)$$

$$U = V_x \hat{i} + V_y \hat{j} + V_z \hat{k} \rightarrow (7)$$

Reemplazo (6) y (7) en (5) y se obtiene la ecuación de continuidad

$$\nabla U = 0 \rightarrow (8)$$

(Versteeg H. K. & Malalasekera W. , 1995)

Método de volumen de fluido (VOF)

Utilizado en la condición de interfase (liquido-gas)

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma U) = 0$$

Donde:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} \rightarrow \text{Derivada Local}$$

$$\nabla \cdot (\gamma U) \rightarrow \text{Termino convectivo}$$

Para los valores del γ

Cuando es un gas $\gamma = 0$

Cuando es un líquido $\gamma = 1$

Donde:

$$\gamma = \frac{m_L}{m_T} = \frac{m_L}{m_g + m_L}$$

$m_L \rightarrow$ masa del liquido

$m_g \rightarrow$ masa del gas

$m_T \rightarrow$ masa total

Para la parte liquida y de gas se puede resumir en una derivada total

$$\frac{D\gamma}{Dt} = 0 \rightarrow \text{liquido}$$

$$\frac{D(1-\gamma)}{Dt} = 0 \rightarrow \text{gas}$$

Entonces se toman dos términos uno global y un error de truncamiento

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \mathbf{U}) + \nabla \cdot [U_r \gamma (1 - \gamma)] = 0 \rightarrow (1)$$

Donde:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \mathbf{U}) \rightarrow \text{Termino global}$$

$$\nabla \cdot [U_r \gamma (1 - \gamma)] \rightarrow \text{Error de truncamiento}$$

Sabiendo que:

$$\mathbf{U} = U_L \gamma + U_g (1 - \gamma) \rightarrow (2)$$

$$U_r = U_L - U_g \rightarrow (3)$$

$$U_r \rightarrow \text{Velocidad relativa}$$

$$U_L \rightarrow \text{Velocidad del liquido}$$

$$U_g \rightarrow \text{Velocidad del gas}$$

Reemplazo la ecuación (2) y (3) en (1)

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma U_L \gamma + U_g (1 - \gamma)) + \nabla \cdot [U_L - U_g \gamma (1 - \gamma)] = 0$$

Simplificando la ecuación

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \gamma^2 U_L + \nabla \gamma U_g - \nabla \gamma^2 U_g + \nabla \gamma U_L - \nabla \gamma U_g - \nabla \gamma^2 U_L + \nabla \gamma^2 U_g = 0$$

Simplificando la ecuación se obtiene la ecuación utilizada por el método VOF

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma U_L) = 0 \rightarrow (4)$$

(Santiago Márquez, (s. f.))

Presión

El software tiene una condición en la programación la cual es la encargada del reconocimiento del proceso que se vaya a trabajar ya que hay dos formas:

Cuando se trabaja con un solo fluido bien sea líquido o gas simplemente el software reconoce esta condición y ejecuta las ecuaciones de continuidad y Navier-Stokes.

Cuando se trabaja con flujo multifásico el software reconoce esta condición y le agrega una ecuación más al solucionador

Es decir:

La presión se resuelve por medio de la ecuación de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad, pero para casos multifásicos se le agrega la ecuación del método VOF.

La ecuación para la presión en el solucionador es la siguiente:

$$P_{r,gh} = p - \rho gh \quad \therefore \quad \rho = CTE$$

$P_{r,gh} \rightarrow$ Presión generada por el solucionador

A esta presión se le agregan condiciones iniciales en la carpeta contenedora del caso.

$p \rightarrow$ Presión Hidrostatica

Esta presión depende de la posición donde se encuentre la partícula en nuestro caso

depende la altura del fluido en el eje z y también depende de la densidad (ρ)

El solucionador de interFoam resuelve las dos presiones (aclaración)

$\rho \rightarrow$ densidad

$gh \rightarrow$ producto escalar del vector g y el vector de posición

Por lo tanto:

$$P_{r,gh} > p \quad \text{si} \quad h > 0$$

$$h=z$$

Entonces:

$$\rho gh = \rho gz$$

Por lo tanto:

$$P_{r,gh} = p - \rho gz$$

(Santiago Márquez, (s. f.))

Toma de datos

Para la toma de datos se trabajó el canal a una escala de 1cm:34.9cm ya que no se tomaron con exactitud las distancias de la ubicación de los puntos a analizar.

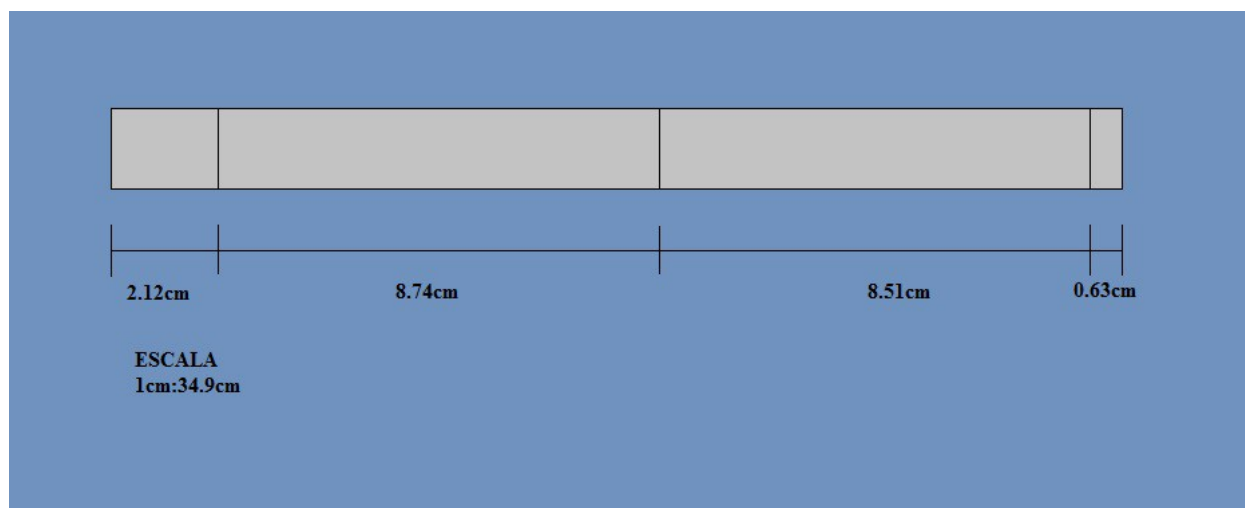


Figura 30. Distancia a escala de los puntos a analizar

Fuente: Elaboración propia.

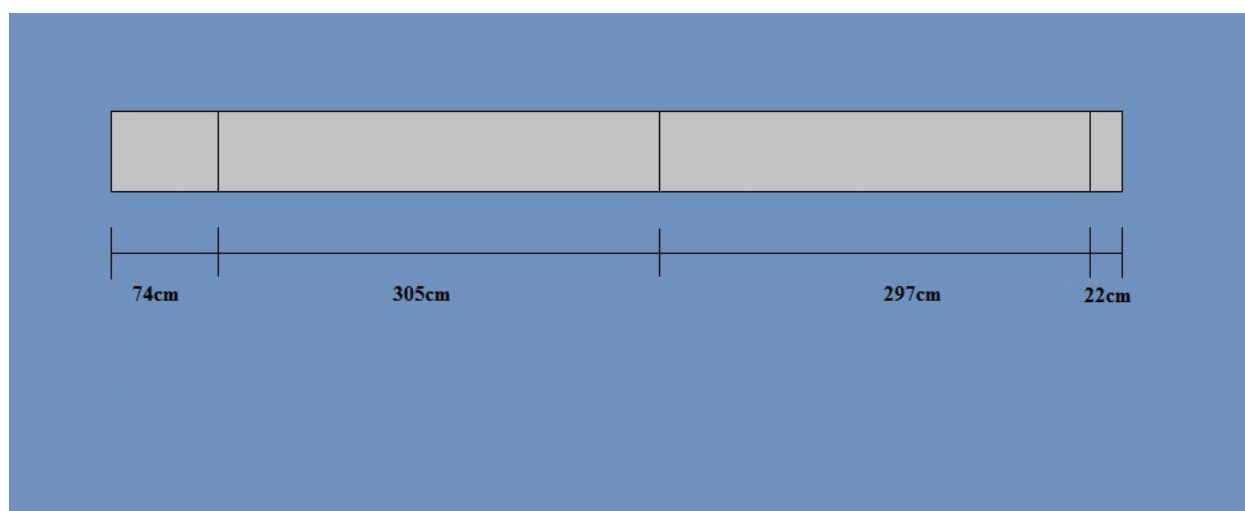


Figura 31. Distancia real de los puntos a analizar

Fuente: Elaboración propia.

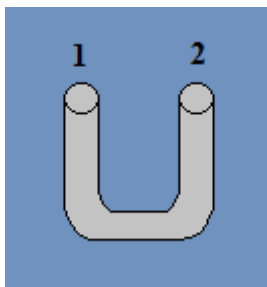


Figura 32. Análisis de alturas

Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se observa un tubo piezométrico abierto a la atmosfera al que se le hace un análisis de alturas teniendo en cuenta la condición de estancamiento.

Condiciones de la posición 1

$$P_1 = 0 \quad \therefore \quad V_1 = 0 \quad \therefore \quad h_1 = ?$$

Condiciones de la posición 2

$$P_2 = 0 \quad \therefore \quad V_2 = \text{dato conocido de tabla} \quad \therefore \quad h_2 = \text{dato conocido de la tabla}$$

Para determinar la altura del fluido y_n con los datos determinados por el software de OPENFOAM se utilizó la ecuación de Bernoulli

Ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2$$

(Yonus A Cengel & John M. Cimbala, 2006)

Con los datos de la posición 1 y 2 la ecuación se simplifica en:

$$h_1 > h_2$$

$$y_n = h_1 = \frac{V_2^2}{2g} + h_2$$

Entonces la altura del fluido se determina por esta ecuación

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + h_2$$

Donde

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

$$h_2 = z_2 = z + \text{altura de la pendiente}$$

$$z_2 = z + 0,015$$

Tabla 6.

Datos de la Pendiente del canal

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO
PENDIENTE

$$S = \frac{Z_1 - Z_2}{X}$$

$$S = 0,0021$$

ALTURA (Z1) = 1,385

ALTURA (Z2) = 1,37

LARGO (X) = 6,98



En la tabla anterior se aprecian las dimensiones y la pendiente obtenida con la que se trabajó el canal.

Tabla 7.
Datos de Caudal real

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO			
TOMA DE DATOS			
PIEZOMETRO	CAUDAL REAL $\frac{m^3}{s}$		
	NUMERO DE VUELTAS		
	3	4	5
16	0,01808	0,02505	0,02786
30	0,01808	0,02464	0,02744
44	0,01471	0,0213	0,02255

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observan los valores reales para el caudal donde se encuentran ubicados los piezómetros de 16, 30 y 44, según el número de vueltas de la válvula que permite el paso del fluido en los puntos.

Tabla 8.
Datos de la Velocidad real

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO			
TOMA DE DATOS			
PIEZOMETRO	VELOCIDAD REAL $\frac{m}{s}$		
	NUMERO DE VUELTAS		
	3	4	5
16	0,586936	0,691225	0,7042
30	0,586936	0,691435	0,704348
44	0,58685	0,691468	0,704423

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observan los valores reales para la velocidad donde se encuentran ubicados los piezómetros de 16, 30 y 44, según el número de vueltas de la válvula que permite el paso del fluido en los puntos.

Velocidades y alturas del fluido

Malla tetrahedrons

Numero de vueltas 3

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

$$V_x = 0,628943 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_y = 0,168136 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_z = 0,108926 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,628943^2 + 0,168136^2 + 0,108926^2}$$

$$V_2 = 0,660078 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,0698335 \text{ m} \quad \therefore \quad g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,0698335 + 0,015$$

$$z_2 = 0,08423 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,660078^2}{2 * 9,81} + 0,08423$$

$$y_n = 0,106437 \text{ m}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 9.
Interpolación 1

PUNTO X	Ux	Uy	Uz	Z
3,77635	0,427634	0,0117248	0,0419959	0,0277031
3,79	0,58281	0,015979	0,0572235	0,035228
3,81589	0,877134	0,0240492	0,0861393	0,0495011

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 0,58281 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_y = 0,015979 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_z = 0,0572235 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,58281^2 + 0,015979^2 + 0,0572235^2}$$

$$V_2 = 0,585831 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,035228 \text{ m} \therefore g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$z_2 = 0,035228 + 0,015$$

$$z_2 = 0,050228 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,585831^2}{2 * 9,81} + 0,050228$$

$$y_n = 0,067720 \text{ m}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 10.
Interpolación 2

PUNTO X	Ux	Uy	Uz	Z
6,72437	0,229638	-0,0112122	0,0213007	0,00719292
6,76	0,439067	-0,021437	0,040727	0,013175
6,76556	0,471749	-0,0230334	0,0437585	0,0141089

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 0,439067 \frac{\text{m}}{\text{s}} \therefore V_y = -0,021437 \frac{\text{m}}{\text{s}} \therefore V_z = 0,040727 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,439067^2 + 0,021437^2 + 0,021437^2}$$

$$V_2 = 0,441472 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,013175 \text{ m} \therefore g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$z_2 = 0,013175 + 0,015$$

$$z_2 = 0,028175 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,441472^2}{2 * 9,81} + 0,028175$$

$$y_n = 0,038108 \text{ m}$$

Numero de vueltas 4

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 11.
Interpolación 3

PUNTO X	Ux	Uy	Uz	Z
0,738873	0,953658	0,0575287	0,135143	0,0766189
0,74	0,95706	0,057557	0,134739	0,076752
0,804978	1,15322	0,0592319	0,11149	0,0844374

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 0,95706 \frac{\text{m}}{\text{s}} \therefore V_y = 0,057557 \frac{\text{m}}{\text{s}} \therefore V_z = 0,134739 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,95706^2 + 0,057557^2 + 0,134739^2}$$

$$V_2 = 0,9682 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,076752 \text{ m} \quad \therefore \quad g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,076752 + 0,015$$

$$z_2 = 0,091752 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,9682^2}{2 * 9,81} + 0,091752$$

$$y_n = 0,1395 \text{ m}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 12.
Interpolación 4

PUNTO X	U _x	U _y	U _z	Z
---------	----------------	----------------	----------------	---

3,78813	0,934041	0,0184203	0,0287557	0,0527885
3,79	0,91046	-0,017955	0,028029	0,051624
3,81616	0,580582	0,0114497	0,017874	0,0353478

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 0,91046 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_y = -0,017955 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_z = 0,028029 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,91046^2 + 0,017955^2 + 0,028029^2}$$

$$V_2 = 0,911068 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,051624 \text{ m} \quad \therefore \quad g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,051624 + 0,015$$

$$z_2 = 0,0666249 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,911068^2}{2 * 9,81} + 0,0666249$$

$$y_n = 0,1089 \text{ m}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 13.
Interpolación 5

PUNTO X	U _x	U _y	U _z	Z
6,72508	0,310544	0,00338377	0,00339177	0,0100576
6,76	0,587439	0,0064	0,003628	0,0184619
6,76273	0,609087	0,00663677	0,00665246	0,019119

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 0,587439 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_y = 0,0064 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_z = 0,003628 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,587439^2 + 0,0064^2 + 0,003628^2}$$

$$V_2 = 0,587485 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,0184619 \text{ m} \quad \therefore \quad g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,0184619 + 0,015$$

$$z_2 = 0,0334619 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,587485^2}{2 * 9,81} + 0,0334619$$

$$y_n = 0,05105 \text{ m}$$

Numero de vueltas 5

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 14.
Interpolación 6

PUNTO X	U _x	U _y	U _z	Z
0,738122	0,948248	0,0249489	0,164741	0,0811428
0,74	0,95481	0,025008	0,162782	0,0813724
0,828848	1,26526	0,0278128	0,0701381	0,0922363

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 0,95481 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_y = 0,025008 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_z = 0,162782 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,95481^2 + 0,025008^2 + 0,162782^2}$$

$$V_2 = 0,968909 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,0813724 \text{ m} \quad \therefore \quad g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,0813724 + 0,015$$

$$z_2 = 0,0963724 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,968909^2}{2 * 9,81} + 0,0963724$$

$$y_n = 0,1442 \text{ m}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 15.
Interpolación 7

PUNTO X	Ux	Uy	Uz	Z
3,78753	1,00908	0,0128082	0,0106432	0,0515096
3,79	1,00169	0,0127144	0,010565	0,051177
3,81593	0,924172	0,0117305	0,00974767	0,0476918

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 1,00169 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_y = 0,0127144 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_z = 0,010565 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{1,00169^2 + 0,0127144^2 + 0,010565^2}$$

$$V_2 = 1,00182 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,051177 \text{ m} \quad \therefore \quad g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,051177 + 0,015$$

$$z_2 = 0,066177 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{1,00182^2}{2 * 9,81} + 0,066177$$

$$y_n = 0,117 \text{ m}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 16.
Interpolación 8

PUNTO X	Ux	Uy	Uz	Z
6,72803	0,680041	-	0,0411172	0,0218798
6,76	0,43109	-0,040689	0,026064	0,013999
6,76653	0,380241	-0,03589	0,0229905	0,01239

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 0,43109 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_y = -0,040689 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad V_z = 0,026064 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,43109^2 + 0,040689^2 + 0,026064^2}$$

$$V_2 = 0,433789 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,013999 \text{ m} \quad \therefore \quad g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$z_2 = 0,013999 + 0,015$$

$$z_2 = 0,028999 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,433789^2}{2 * 9,81} + 0,028999$$

$$y_n = 0,038 \text{ m}$$

Malla hexahedrons

Numero de vueltas 3

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 17.
Interpolación 9

PUNTO X	Ux	Uy	Uz	Z
0,698	0,938504	0,00217532	-0,0186999	0,0814759
0,74	0,93789	0,00201348	-0,0162426	0,08117523
0,835428	0,936497	0,00164575	-0,0106596	0,0804921

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 0,93789 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \therefore \quad V_y = 0,00201348 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \therefore \quad V_z = -0,0162426 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,93789^2 + 0,00201348^2 + 0,0162426^2}$$

$$V_2 = 0,938032 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,08117523 \text{ m} \quad \therefore \quad g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,08117523 + 0,015$$

$$z_2 = 0,0961752 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,938032^2}{2 * 9,81} + 0,0961752$$

$$y_n = 0,141 \text{ m}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 18.
Interpolación 10

PUNTO X	Ux	Uy	Uz	Z
3,76818	1,04424	0,00019994	0,00512354	0,0671813
3,79	1,044773	0,00040824	0,00510815	0,0671006
3,95533	1,04882	0,00198653	0,00499151	0,0664898

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 1,044773 \frac{m}{s} \quad \therefore V_y = 0,00040824 \frac{m}{s} \quad \therefore V_z = -0,00510815 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{1,044773^2 + 0,00040824^2 + 0,00510815^2}$$

$$V_2 = 1,044785 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,0671006 \text{ m} \quad \therefore g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,0671006 + 0,015$$

$$z_2 = 0,0821006 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{1,044785^2}{2 * 9,81} + 0,0821006$$

$$y_n = 0,1377 \text{ m}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 19.
Interpolación 11

PUNTO X	Ux	Uy	Uz	Z
6,74733	1,20921	-0,0027582	-0,00537305	0,0461162
6,76	1,211	-0,0027709	-0,005338	0,0460635
6,89145	1,22953	-0,0029024	-0,00498205	0,0455189

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 1,211 \frac{m}{s} \quad \therefore V_y = -0,0027709 \frac{m}{s} \quad \therefore V_z = -0,005338 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{1,211^2 + 0,0027709^2 + 0,005338^2}$$

$$V_2 = 1,211014 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,0460635 \text{ m} \quad \therefore g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,0460635 + 0,015$$

$$z_2 = 0,0610635 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{1,211014^2}{2 * 9,81} + 0,0610635$$

$$y_n = 0,135 \text{ m}$$

Numero de vueltas 4

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 20.
Interpolación 12

PUNTO X	U _x	U _y	U _z	Z
---------	----------------	----------------	----------------	---

0,717571	0,725128	-0,0004765	-0,0191634	0,0964246
0,74	0,733277	-0,0005683	-0,0185314	0,0960616
0,930667	0,802558	-0,00134864	-0,0131594	0,0929762

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 0,733277 \frac{m}{s} \quad \therefore V_y = -0,0005683 \frac{m}{s} \quad \therefore V_z = -0,0185314 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,733277^2 + 0,0005683^2 + 0,0185314^2}$$

$$V_2 = 0,733511 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,0960616 \text{ m} \quad \therefore g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,0960616 + 0,015$$

$$z_2 = 0,1110 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,733511^2}{2 * 9,81} + 0,1110$$

$$y_n = 0,1384 \text{ m}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 21.

Interpolación 13

PUNTO X	U _x	U _y	U _z	Z
3,72267	1,04339	0,00092215	-0,00312008	0,0750312
3,79	1,034269	0,0007339	-0,0032874	0,0744386
3,87415	1,02287	0,00049868	-0,00349656	0,0736981

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 1,034269 \frac{m}{s} \quad \therefore V_y = 0,0007339 \frac{m}{s} \quad \therefore V_z = -0,0032874 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{1,034269^2 + 0,0007339^2 + 0,0032874^2}$$

$$V_2 = 1,034274 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,0744386 \text{ m} \quad \therefore g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,0744386 + 0,015$$

$$z_2 = 0,0894386 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{1,034274^2}{2 * 9,81} + 0,0894386$$

$$y_n = 0,143 \text{ m}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 22.

Interpolación 14

PUNTO X	U _x	U _y	U _z	Z
6,74733	1,20256	1,28E-05	-0,00496292	0,0555623
6,76	1,203546	0,000009821	-0,004887	0,05550618
6,85071	1,21061	-1,18E-05	-0,00434458	0,0551044

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 1,203546 \frac{m}{s} \quad \therefore V_y = 0,000009821 \frac{m}{s} \quad \therefore V_z = -0,004887 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{1,203546^2 + 0,000009821^2 + 0,004887^2}$$

$$V_2 = 1,203555 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,05550618 \text{ m} \quad \therefore g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,05550618 + 0,015$$

$$z_2 = 0,07050618 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{1,203555^2}{2 * 9,81} + 0,07050618$$

$$y_n = 0,144 \text{ m}$$

Numero de vueltas 5

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 23.
Interpolación 15

PUNTO X	U _x	U _y	U _z	Z
0,698	0,707434	-0,00154821	-0,0144941	0,097658
0,74	0,71051538	-0,00132039	-0,0136973	0,0969366
0,777287	0,713251	-0,00111815	-0,01299	0,0962963

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 0,71051538 \frac{m}{s} \quad \therefore V_y = -0,00132039 \frac{m}{s} \quad \therefore V_z = -0,0136973 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{0,71051538^2 + 0,00132039^2 + 0,0136973^2}$$

$$V_2 = 0,710648 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,0969366 \text{ m} \quad \therefore g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,0969366 + 0,015$$

$$z_2 = 0,1119366 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{0,710648^2}{2 * 9,81} + 0,1119366$$

$$y_n = 0,137 \text{ m}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 24.
Interpolación 16

PUNTO X	U _x	U _y	U _z	Z
3,72267	1,06115	-1,92E-05	-0,00350503	0,0777145
3,79	1,072439	-0,000198	-0,00334777	0,07702188
3,82686	1,07862	-0,00029591	-0,00326167	0,0766427

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 1,072439 \frac{m}{s} \quad \therefore V_y = -0,000198 \frac{m}{s} \quad \therefore V_z = -0,00334777 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{1,072439^2 + 0,000198^2 + 0,00334777^2}$$

$$V_2 = 1,072444 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,07702188 \text{ m} \quad \therefore g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,07702188 + 0,015$$

$$z_2 = 0,09202187 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{1,072444^2}{2 * 9,81} + 0,09202187$$

$$y_n = 0,150 \text{ m}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Para la velocidad

$$V_2 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 25.

Interpolación 17

PUNTO X	U _x	U _y	U _z	Z
6,74733	1,2168	0,00151505	-0,00558944	0,0559119
6,76	1,2176	0,00150846	-0,00551308	0,0558622
6,82704	1,22214	0,00147362	-0,00510906	0,0555995

Fuente: Elaboración propia.

$$V_x = 1,2176 \frac{m}{s} \quad \therefore V_y = 0,00150846 \frac{m}{s} \quad \therefore V_z = -0,00551308 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta

$$V_2 = \sqrt{1,2176^2 + 0,00150846^2 + 0,00551308^2}$$

$$V_2 = 1,21763 \frac{m}{s}$$

Para la altura del fluido

$$y_n = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_2 = z + 0,015$$

$$z = 0,0558622 \text{ m} \quad \therefore g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$z_2 = 0,0558622 + 0,015$$

$$z_2 = 0,0708622 \text{ m}$$

$$y_n = \frac{1,21763^2}{2 * 9,81} + 0,0708622$$

$$y_n = 0,146 \text{ m}$$

Presiones

Malla tetrahedrons

Numero de vueltas 3

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

$$P = 336,104 \text{ Pa} \quad \therefore P_{rgh} = 499,785 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 26.
Interpolación 18

X	P	P_rgh
3,77635	313,078	360,976
3,79	309,1421	362,025
3,81589	301,677	364,015

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 309,1421 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 362,025 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 27.
Interpolación 19

X	P	P_rgh
6,72437	222,567	229,108
6,76	205,897	215,648
6,76556	203,296	213,548

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 205,897 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 215,648 \text{ Pa}$$

Numero de vueltas 4

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 28.
Interpolación 20

X	P	P_rgh
0,738873	331,355	523,943
0,74	330,186	524,198
0,804978	262,82	538,912

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 330,186 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 524,198 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 29.
Interpolación 21

X	P	P_rgh
3,78813	301,207	364,456
3,79	309,854	372,334
3,81616	430,821	482,556

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 309,854 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 372,334 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 30.
Interpolación 22

X	P	P_rgh
6,76273	382,307	402,268
6,76	381,6119	400,977
6,72508	372,722	384,475

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 381,6119 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 400,977 \text{ Pa}$$

Numero de vuelta 5

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 31.
Interpolación 23

X	P	P_rgh
0,738122	326,202	530,896
0,74	324,169	531,598
0,828848	228,021	564,839

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 324,169 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 531,598 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 32.
Interpolación 24

X	P	P_rgh
3,78753	266,946	327,662
3,79	271,866	332,304
3,81593	323,52	381,456

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 271,866 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 332,304 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 33.
Interpolación 25

X	P	P _{rgh}
676.653	341,086	354,293
6,76	322,078	336,792
6,72803	229,022	251,115

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 322,078 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{rgh} = 336,792 \text{ Pa}$$

Malla hexahedrons

Numero de vueltas 3

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 34.
Interpolación 26

X	P	P _{rgh}
0,698	26,525	418,611
0,74	24,222	414,699
0,835428	18,9926	405,813

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 24,222 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{rgh} = 414,699 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 35.
Interpolación 27

X	P	P _{rgh}
---	---	------------------

3,76818	14,2806	334,159
3,79	14,345	333,805
3,95533	14,8408	331,129

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 14,345 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 333,805 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 36.
Interpolación 28

X	P	P _{rgh}
6,7473	15,6565	231,67
6,76	15,694	231,412
6,89145	16,085	228,751

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 15,694 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 231,412 \text{ Pa}$$

Numero de vueltas 4

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 37.
Interpolación 29

X	P	P _{rgh}
0,717571	18,5911	487,688
0,74	18,329	485,153
0,930667	16,1091	463,61

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 18,329 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 485,153 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 38.
Interpolación 30

X	P	P_rgh
3,72267	16,0394	374,488
3,79	15,257	370,976
3,87415	14,2805	366,587

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 15,257 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 370,976 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 39.
Interpolación 31

X	P	P_rgh
6,74733	15,4625	277,886
6,76	15,505	277,429
6,85071	15,8173	274,163

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 15,505 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 277,429 \text{ Pa}$$

Número de vueltas 5

Piezómetro numero 16 ubicado a una distancia de 0,74 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 40.
Interpolación 32

X	P	P_rgh
0,698	18,1978	489,979
0,74	17,7636	487,6418
0,777287	17,3783	485,567

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 17,7636 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 487,6418 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 30 ubicado a una distancia de 3,79 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 41.
Interpolación 33

X	P	P_rgh
3,72267	14,9255	388,061
3,79	14,4971	385,8612
3,82686	14,2627	384,657

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 14,4971 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 385,8612 \text{ Pa}$$

Piezómetro numero 44 ubicado a una distancia de 6,76 m

Ya que el valor de este punto no se encuentra con exactitud en la tabla se interpola un valor menor y un valor mayor para encontrarlo.

Tabla 42.
Interpolación 34

X	P	P_rgh
6,7473	15,2181	279,489
6,76	15,252	279,1979
6,82704	15,4318	277,658

Fuente: Elaboración propia.

$$P = 15,252 \text{ Pa} \quad \therefore \quad P_{\text{rgh}} = 279,1979 \text{ Pa}$$

Comparación de datos

Tabla 43.*Comparación de datos de la velocidad*

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO									
COMPARACION DE DATOS DE LA VELOCIDAD									
VELOCIDAD	NUMERO DE VUELTAS								
	3			4			5		
AD	PIEZOMETRO			PIEZOMETRO			PIEZOMETRO		
	16	30	44	16	30	44	16	30	44
MANNING	0,6454	0,6454	0,5919	0,6836	0,6876	0,6436	0,7058	0,7017	0,6515
CHEZZY (b)	0,3309	0,3309	0,2836	0,3677	0,3629	0,3301	0,3875	0,382	0,3379
CHEZZY (k)	0,6828	0,6828	0,6201	0,7354	0,728	0,6853	0,761	0,7596	0,6983
OPENFOAM (T)	0,660078	0,585831	0,441472	0,9682	0,911068	0,587485	0,968909	1,00182	0,433789
OPENFOAM (H)	0,938032	1,044785	1,211014	0,733511	1,034274	1,203555	0,710648	1,072444	1,217613
REAL	0,586936	0,586936	0,58685	0,691225	0,691435	0,691468	0,7042	0,704348	0,704423

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observa la comparación de datos de los valores de las velocidades encontradas por medio de métodos semi-empíricos o métodos aproximados usados en la práctica de laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, con respecto a los resultados obtenidos por medio de las ecuaciones gobernantes generados por el solucionador de interfoam.

Tabla 44.*Comparación de datos de altura del fluido*

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO			
COMPARACION DE DATOS DE ALTURA DEL FLUIDO			
PIEZOMETRO	ALTURA DEL FLUIDO ENCONTRADA EN LA PRACTICA	ALTURA DEL FLUIDO ENCONTRADA EN OPENFOAM MALLA TETRAHEDRONS	ALTURA DEL FLUIDO ENCONTRADA EN OPENFOAM MALLA HEXAHEDRONS
O			

	NUMERO DE VUELTAS			NUMERO DE VUELTAS			NUMERO DE VUELTAS		
	3	4	5	3	4	5	3	4	5
16	0,102	0,12	0,131	0,106	0,139	0,144	0,141	0,138	0,137
30	0,102	0,118	0,129	0,067	0,108	0,117	0,137	0,143	0,15
44	0,083	0,102	0,106	0,038	0,051	0,038	0,135	0,144	0,146

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observa la comparación de datos de las alturas halladas en la práctica de laboratorio de hidráulica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña en las cuales no se tiene en cuenta la condición de estancamiento, con respecto a los resultados obtenidos para la altura determinada por el software más la pendiente que tiene el canal.

Tabla 45.

Toma de datos de presiones en malla Tetrahedrons

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO						
TOMA DE DATOS DE PRESIONES DE MALLA TETRAHEDRONS						
PIEZOMETRO	PRESION (Pa)			PRESION p_rgh (Pa)		
	NUMERO DE VUELTAS			NUMERO DE VUELTAS		
	3	4	5	3	4	5
16	336,104	330,186	324,169	499,785	524,198	531,5598
30	309,1421	309,854	271,866	362,025	372,334	332,304
44	205,897	381,6119	322,078	215,648	400,977	336,792

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observan los valores obtenidos en la malla Tetrahedrons para la presión generada por el solucionador interfoam y la presión hidrostática dentro de un canal abierto.

Tabla 46.
Toma de datos de presiones en malla Hexahedrons

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO						
TOMA DE DATOS SIMULACION DE MALLA HEXAHEDRONS						
PIEZOMETRO	PRESION (Pa)			PRESION p_rgh (Pa)		
	NUMERO DE VUELTAS			NUMERO DE VUELTAS		
	3	4	5	3	4	5
16	24,222	18,329	17,7636	414,699	485,153	487,6418
30	14,345	15,257	14,4971	333,805	370,976	385,8612
44	15,694	15,505	15,252	231,412	277,429	279,1979

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observan los valores obtenidos en la malla Hexahedrons para la presión generada por el solucionador interfoam y la presión hidrostática dentro de un canal abierto.

Tabla 47.
Diferencia velocidad 3 vueltas

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO							
PORCENTAJE DE EROR							
PIEZOMETR	O	MANING	VELOCIDAD 3 VUELTAS				REAL
			CHEZZY B	CHEZZY K	OPENFOA M (T)	OPENFOA M (H)	
16		0,6454	0,3309	0,6828	0,660078	0,938032	0,586936
30		0,6454	0,3309	0,6828	0,585831	1,044785	0,586936
44		0,5919	0,2836	0,6201	0,441472	1,211014	0,58685
				ERROR			
16		9,96088159	43,6224733	16,3329562	12,4616653	59,8184469	0
		5	2	3	3	9	
30		9,96088159	43,6224733	16,3329562	0,18826584	78,0066310	0
		5	2	3	2	5	
44		0,86052654	51,6741927	5,66584306	24,7725994	106,358353	0
			2		7	9	

PROMEDIO 12,47417688 81,39447732

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observa el margen de error de las velocidades de 3 vueltas encontradas en el canal abierto ubicado en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, con respecto a la velocidad real y se generó un promedio de error en el cual se pueden sacar conclusiones sobre los resultados.

Tabla 48.
Diferencia de velocidad 4 vueltas

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO

PORCENTAJE DE EROR						
PIEZOMETRO	VELOCIDAD 4 VUELTAS					
	MANING	CHEZZY B	CHEZZY K	OPENFOAM (T)	OPENFOAM (H)	REAL
16	0,6836	0,3677	0,7354	0,9682	0,733511	0,691225
30	0,6876	0,3629	0,728	0,911068	1,034274	0,691435
44	0,6436	0,3301	0,6853	0,587485	1,203555	0,691468
ERROR						
16	-1,103114037	46,80458606	6,390827878	40,07016529	6,117544938	0
30	-0,554643604	47,51495079	5,288277278	31,76480797	49,58369189	0
44	-6,922663088	52,26098677	-0,892015249	15,0380061	74,05794628	0

PROMEDIO 28,95765979 43,25306104

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observa el margen de error de las velocidades de 4 vueltas encontradas en el canal abierto ubicado en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, con respecto a la velocidad real y se generó un promedio de error en el cual se pueden sacar conclusiones sobre los resultados.

Tabla 49.
Diferencia de velocidad 5 vueltas

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES,
PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO

PIEZOMETRO	PORCENTAJE DE EROR					
	VELOCIDAD 5 VUELTAS					
	MANING	CHEZZY B	CHEZZY K	OPENFOAM (T)	OPENFOAM (H)	REAL
16	0,7058	0,3875	0,761	0,968909	0,710648	0,7042
30	0,7017	0,382	0,7596	1,00182	1,072444	0,70434 8
44	0,6515	0,3379	0,6983	0,433789	1,217613	0,70442 3
	ERROR					
16	62,70583164	10,67085611	75,43091226	37,59003124	130,9463818	0
30	-0,375950524	45,76544549	7,844417816	42,23366858	52,26053031	0
44	-7,512957413	52,03166279	-0,869222044	38,41924525	72,85253321	0
	PROMEDIO			39,41431503	85,35314843	

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observa el margen de error de las velocidades de 5 vueltas encontradas en el canal abierto ubicado en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, con respecto a la velocidad real y se generó un promedio de error en el cual se pueden sacar conclusiones sobre los resultados.

Tabla 50.
Diferencia en porcentaje de altura del fluido

SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL ABIERTO						
PORCENTAJE DE EROR						
TIPO DE ALTURA	PIEZOMETRO			DIFERENCIA EN PORCENTAJE 3 VUELTAS	DIFERENCIA EN PORCENTAJE 4 VUELTAS	DIFERENCIA EN PORCENTAJE 5 VUELTAS
	16	30	44			
ALTURA DEL FLUIDO ENCONTRADA EN LA PRACTICA	ALTURAS 3 VUELTAS			0	0	0
	ALTURA 4 VUELTAS			0	0	0
	ALTURA 5 VUELTAS			0	0	0
ALTURA DEL FLUIDO ENCONTRADA EN OPEN FOAM (T)	0,102	0,102	0,083	4,901960784	34,31372549	54,21686747
	ALTURAS 3 VUELTAS					
	0,12	0,118	0,102	15,83333333	8,474576271	50
ALTURA DEL FLUIDO ENCONTRADA EN OPEN FOAM (T)	ALTURA 4 VUELTAS					
	0,131	0,129	0,106	9,923664122	9,302325581	64,1509434
	ALTURAS 3 VUELTAS					

ENCONTRADA EN OPEN FOAM (H)	0,141	0,137	0,135	382,3529412	34,31372549	62,65060241
	ALTURA 4 VUELTAS					
	0,138	0,143	0,144	150	21,18644068	41,17647059
	ALTURA 5 VUELTAS					
	0,137	0,15	0,146	45,80152672	16,27906977	37,73584906

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observa la diferencia de las alturas obtenidas en la práctica de laboratorio de hidráulica de la universidad francisco de paula Santander Ocaña en porcentaje de error con respecto a las alturas obtenidas por medio del software de openfoam y teniendo en cuenta las condiciones de estancamiento.

Conclusiones

Durante toda la realización de este trabajo de grado, cabe destacar la dificultad al definir el modelo multifásico correcto debido a la cantidad de opciones entre condiciones, parámetros y modelizados. Por eso ha habido una gran variedad de casos a simular los cuales contribuyen al comienzo del estudio de canales abiertos.

Se usaron tres softwares libres en la programación, los cuales fueron acoplados uno al otro de manera simultánea. En el software de **salome** se generó la geometría del canal con las condiciones necesarias de mallado y se seleccionaron dos tipos de mallas para simular, en el software de **openFOAM** se verificó la malla, se adecuaron las condiciones de fronteras y las condiciones iniciales correspondientes al caso de flujo incompresible laminar a simular y se ejecuta el código del solucionador requerido para este caso se ejecutó (interFoam) y por último el software de **paraview** el cual nos permite visualizar la simulación y los valores obtenidos, también nos da la opción de exportar una tabla a Excel con los datos encontrados y

allí se procede a analizar los datos en los puntos seleccionados y compararlos con los puntos en la práctica.

Se logró adaptar un caso real en el software y se hizo una breve comparación con resultados experimentales, a pesar de contar con tan poca información sobre el software es satisfactorio apreciar que el caso del cual hizo selección se logró simular sin presentar error alguno en la parte de la programación.

En la malla tetrahedrons se logra una mejor visualización del comportamiento de las presiones y el fluido a lo largo del canal, se logra visualizar al final del tiempo programado una línea recta que nos indica la estabilidad del fluido, mientras que en la malla hexahedrons la visualización del comportamiento de lo que sucede dentro del canal es poca y también se genera una línea recta del fluido indicándonos su estabilidad.

Recomendaciones

Se deberían aumentar las prácticas de campo que se realizan en la carrera de ingeniería mecánica, ya que el alumno se identificará aún más con su carrera cuando sepa cómo se aplica todas las teorías brindadas en clase en el entorno natural.

Se recomienda generar un modelo computacional con otros tipos de mallado para que el usuario logre comparar los valores obtenidos con respecto a los hallados en este trabajo de grado y de esta manera conocer la diferencia que existe entre resultados.

Se recomienda al plan de estudios de Ingeniería Mecánica difundir el software openFOAM ya que este es libre y sirve de mucha ayuda para que el estudiante pueda visualizar el comportamiento de fluidos y no quedarse solo en la parte teórica, la idea es cambiar la metodología de estudio que sea teórico – práctica.

Referencias

Arias, f. (2006). El proyecto de investigacion . Caracas Venezuela.: Episteme.

Arteaga Noguera, L. E. (2014). Obtenido de

<https://sites.google.com/site/asignaturasaurar/mecanismos>

Corcho Romer, F. H. (2010). *Acueductos: teoría y diseño*. . Medellín.: Universidad de Medellín.

García. (2002). Metodología de la Investigacion . Venezuela.

Hughes, W. F. (2000). *Teoría y problemas de dinámica de fluidos*. México: : Mc Graw Hill,.

Lopez Cualla, R. A. (2011). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería,.

Paraview. org. (2016). *Que es paraview*. Obtenido de <https://www.paraview.org/>

- Parra Viol, J. P. (2015). *Estudio e implementación de nuevas funcionalidades de deformación de malla en un software de mecánica de fluidos computacional*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13973/memoria.pdf>
- Ramírez Tejeda, A. (. (s.f.). 2000.
- Salome.org. (2016). *Qué es SALOME*. <http://www.salome-platform.org/>.
- Santiago Márquez, D. ((s. f.)). *Final Work-Computational Fluid Dynamics*. Obtenido de <http://infofich.unl.edu.ar/upload/3be0e16065026527477b4b948c4caa7523c8ea52.pdf>
- Ven Te Chow. (2012). *“HIDRÁULICA DE LOS CANALES ABIERTOS”*. . (33-37 Pp.). MÉXICO. : EDITORIAL DIANA.
- Versteeg H. K. & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*. *Fluid flow handbook*. McGraw-Hill. Obtenido de <https://doi.org/10.2514/1.22547>
- Versteeg H. K. & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*. *Fluid flow handbook*. McGraw-Hill. Obtenido de <https://doi.org/10.2514/1.22547>
- Yonus A Cengel & John M. Cimbala. (2006). *Mecánica de fluidos - Fundamentos y aplicaciones*. . McGraw-Hill.

Apéndice

Apéndice 1. Manual del usuario openFOAM

**MANUAL DE USUARIO PARA LA SIMULACIÓN
MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPENFOAM
DEL CAMPO DE VELOCIDADES, PRESIONES Y
EL CAMBIO DE SU INTERFASE EN UN CANAL
ABIERTO DE FLUJO LAMINAR.**



**Universidad Francisco
de Paula Santander**

Ocaña - Colombia
Vigilada Mineducación

Version 1

2018

OpenFOAM

Introducción

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) es una biblioteca C++ para personalizar y extender solucionadores numéricos de problemas de Mecánica de medios continuos, incluyendo Mecánica de fluidos computacional (CFD). Sin embargo, incluye también una gran cantidad de solucionadores aplicables a otros muchos tipos de problemas.

OpenFOAM es un software libre para la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) desarrollado por la OpenFOAM Foundation y distribuida bajo licencia

de público general GNU. OpenFOAM tiene una serie extensa de herramientas para la simulación de fluidos que son muy empleadas tanto en las área de ingeniería como de la investigación científica.

1. ¿Qué es OpenFoam?

OPENFOAM® (Open Field Operation And Manipulation) es una herramienta de simulación numérica basada en esquemas de volúmenes finitos (básicamente, se trata de una biblioteca de utilidades para implementar un esquema de volúmenes finitos) especialmente orientada para la simulación numérica en mecánica de fluidos (cfd).

Es un código de software libre (con acceso, por tanto, al código fuente) programado en C++ y producido por opencfd ltd.

OPENFOAM® es capaz de resolver tanto flujos sencillos como complejos (incluyendo flujos turbulentos, fenómenos de transferencia de calor y reacciones químicas), así como problemas en otros campos (como problemas electromagnéticos).

Una de las principales ventajas, al margen de su flexibilidad, es su capacidad para ser ejecutado en paralelo. La implementación del cálculo distribuido (basada en el uso de mpi y directamente explotable por parte de procesadores multinúcleo, clúster o redes de ordenadores) no añade ninguna dificultad al usuario, por lo que la capacidad de cálculo del código está únicamente limitada por el hardware disponible

OpenFOAM es una librería de archivos en C++, usada principalmente para crear ejecutables, conocidas como applications. Las aplicaciones pueden ser de dos tipos:

- solvers, diseñados para resolver problemas específicos de medios continuos;
- utilities, diseñadas para ejecutar tareas que involucran manipulación de datos

Una de las fortalezas de OpenFOAM es que cada usuario puede crear nuevos solvers y utilities siempre que tenga un conocimiento previo de la física involucrada y técnicas de programación.

OpenFOAM se instala con herramientas adicionales para el pre- y post-procesado de los resultados.

Se instala en sistemas operativos Linux (ver en www.openfoam.com detalles sobre la instalación).

No existe instalación para Windows. En este caso es necesario instalarlo como una máquina virtual

2. Instalación en S.O. Windows

- Bajar e instalar la máquina virtual para sistema operativo Windows:

<http://www.oracle.com/technetwork/es/server-storage/virtualbox/downloads/index.html>

- Una vez instalada la máquina virtual, ejecutadla, e ir a:

archivo >> importar servicio actualizado y escoger el archivo: Debian7SoftLibre.ova

- El usuario normal y su contraseña es alumno
- El superusuario es root con contraseña admin

- Introducir en la máquina virtual la carpeta Tutoriales mediante dispositivo usb
- Antes de ejecutar comandos en terminales: Abrir terminal y ejecutar el script

startFoam

3. Código fuente

- Comandos útiles para navegar en las fuentes de OpenFOAM:

app = \$WM_PROJECT_DIR/applications

sol = \$WM_PROJECT_DIR/applications/solvers

util = \$WM_PROJECT_DIR/applications/utilities

src = \$WM_PROJECT_DIR/src

- Variables de entorno:

\$FOAM_APP = \$WM_PROJECT_DIR/applications

\$FOAM_SOLVERS = \$WM_PROJECT_DIR/applications/solvers

\$FOAM_UTILITIES = \$WM_PROJECT_DIR/applications/utilities

\$FOAM_SRC = \$WM_PROJECT_DIR/src

4. Estructura de OpenFoam

Ejecutar en terminal:

startFoam

cd \$WM_PROJECT_DIR

applications: Ficheros fuente de todos los ejecutables:

solvers

utilities

bin

test

bin: scripts básicos de ejecución.

doc: pdf y Doxygen documentacion.

Doxygen

Guides-a4

lib: librerías compiladas.

src: ficheros librería fuente.

test: ficheros Fuente para testear las librerías.

tutorials: tutoriales, casos de ejemplo.

wmake: compilación.

5. Procedimiento

Este será un breve manual de usuario en el cual se presentara la instalación y la implementación de los códigos necesarios del software de openfoam, se dejara la carpeta contenedora de la estructura del caso con la programación requerida para la simulación del campo de velocidades, presiones y el cambio de su interfase en un canal abierto de flujo laminar y se presentara como manipular únicamente la condición inicial de la velocidad.

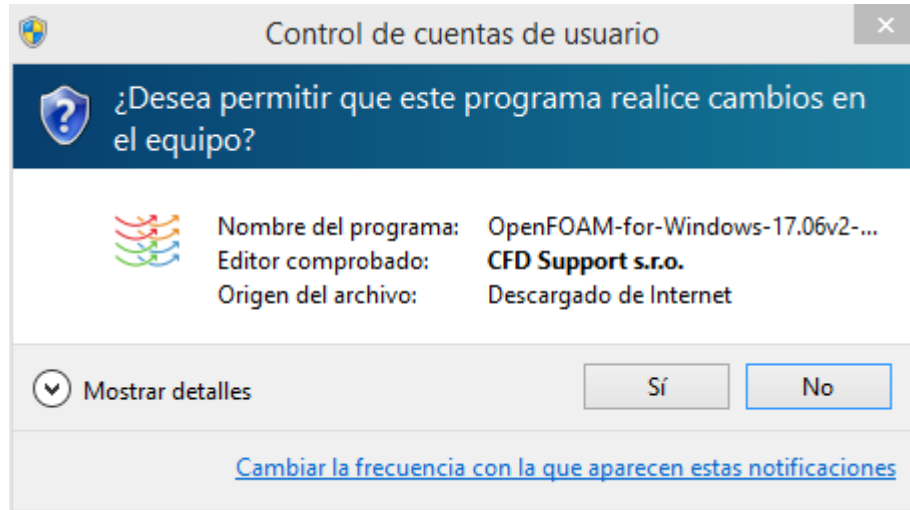
También se mostrara el uso del software de paraview el cual permite la visualización de la simulación se enseñaran a hacer contorno de las variables y se mostrara como exportar los datos encontrados a Excel para facilitar su búsqueda.

1. PROGRAMAS A UTILIZAR Y PASOS PARA SU INSTALACION

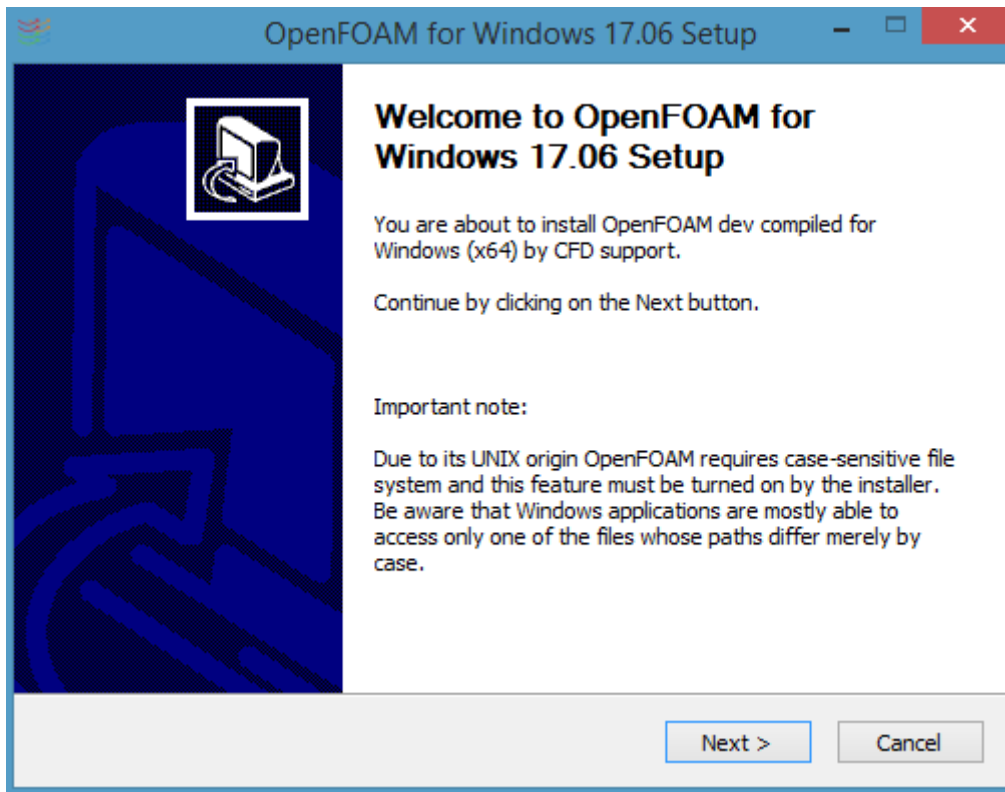
Instalación del software de openfoam para Windows (Recomendación instalar en Windows 10 y tener un sistema operativo de 64 bit)

PASOS PARA LA INSTALACION

Buscar dentro del contenido disponible en el cd, la carpeta llamada openFoam la cual contiene el programa listo para su instalación y se pega en el lugar que se desee en la computadora, se ejecuta como administrador el archivo llamado OpenFOAM-for-Windows-17.06v2-win64-install y se procede a dar permisos para que el programa realice cambios en su computadora.



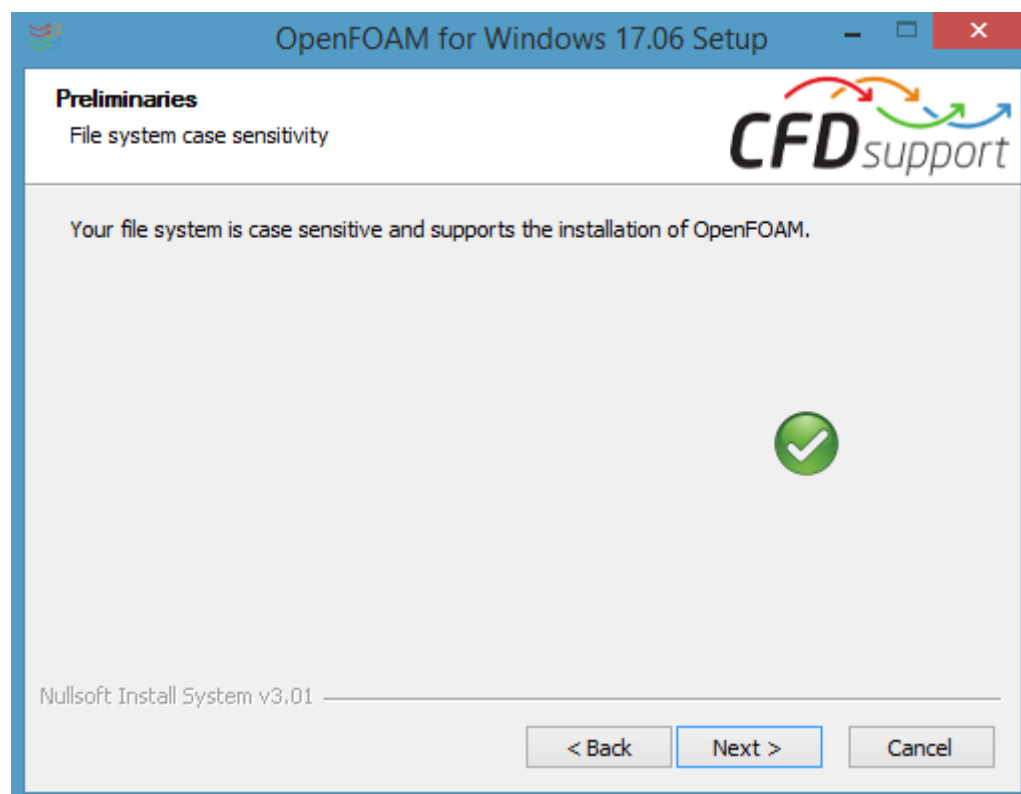
Aparece un mensaje de bienvenida en el cual le damos next para continuar con la instalación.



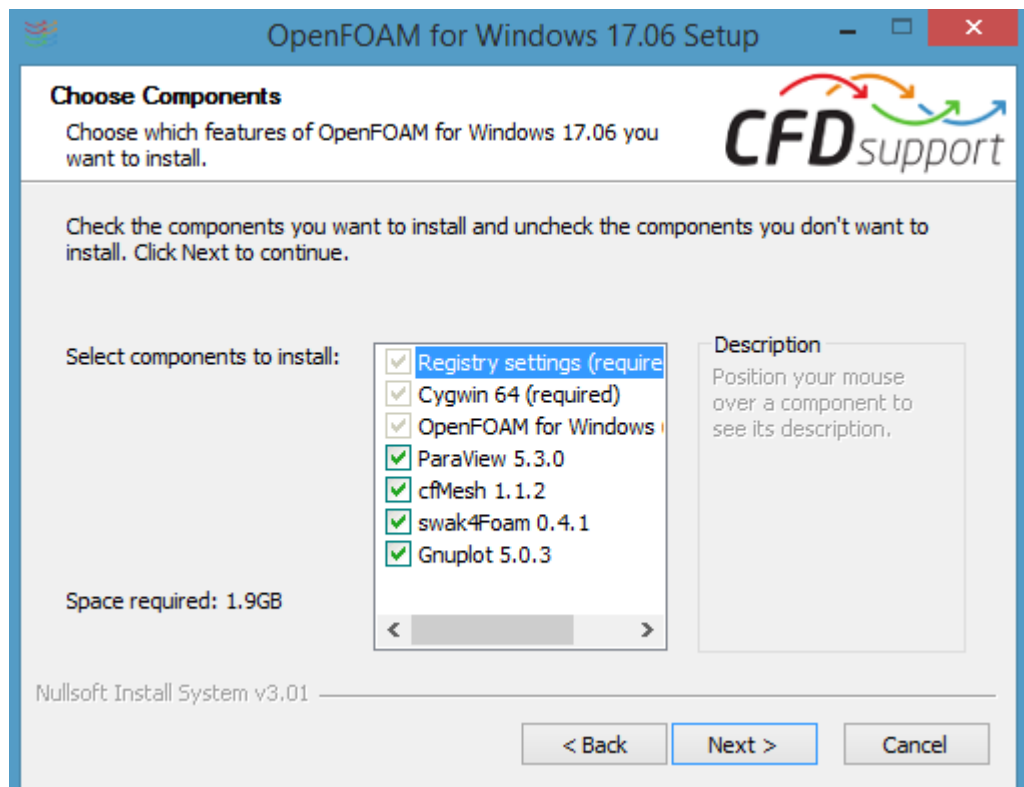
El instalador modificara el registro y reiniciara la computadora para hacer algunos cambios una vez esto realizado el instalador se activara, se le da next para proceder a lo dicho anteriormente y luego ok para permitir el reinicio de la computadora.



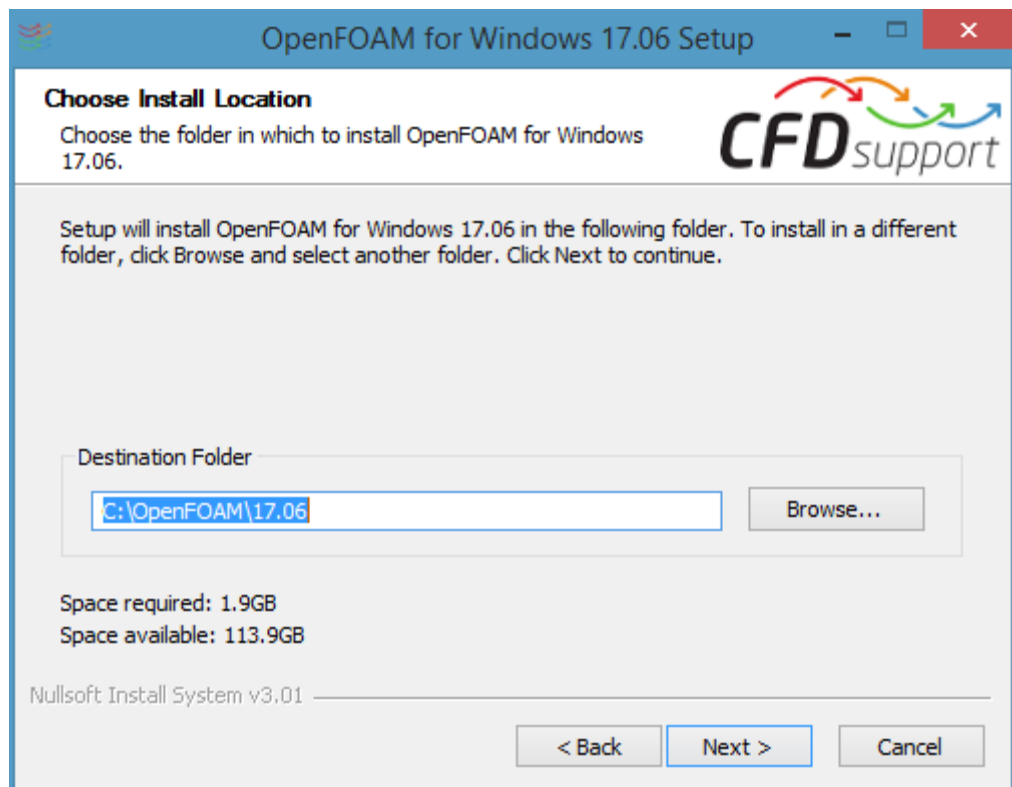
Luego de que la computadora se haya reiniciado aparece un mensaje de permiso para que openFoam realice cambios en la computadora se procede a darle ok, llegado el caso que no aparezca este mensaje y no se ejecute de manera automática el openFoam se busca en donde se guardó el archivo de OpenFOAM-for-Windows-17.06v2-win64-install y se ejecuta nuevamente como administrador y se da en next para continuar con la instalación.



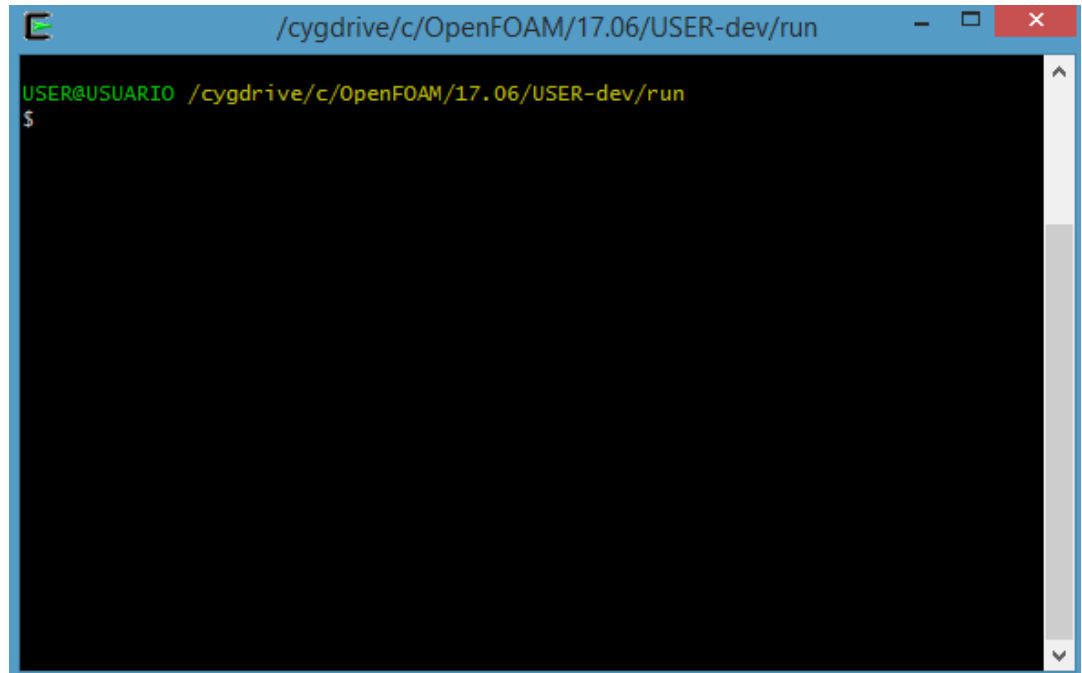
Ahora nos aparece la opción para la selección de componentes que se desean instalar es necesario tener seleccionado todas las casillas visibles y se procede a dar next.



Ahora se elige el lugar que se desee para la instalación del programa, en este caso se dejara la ruta que aparece por defecto y se procede a continuar con el proceso.



Ahora aparecerán varios procesadores a los que se les dará next ya que son complementos necesarios del openfoam y Se deja finalizar la instalación del programa y se marca la opción de ejecutar y se procede a finalizar el proceso.

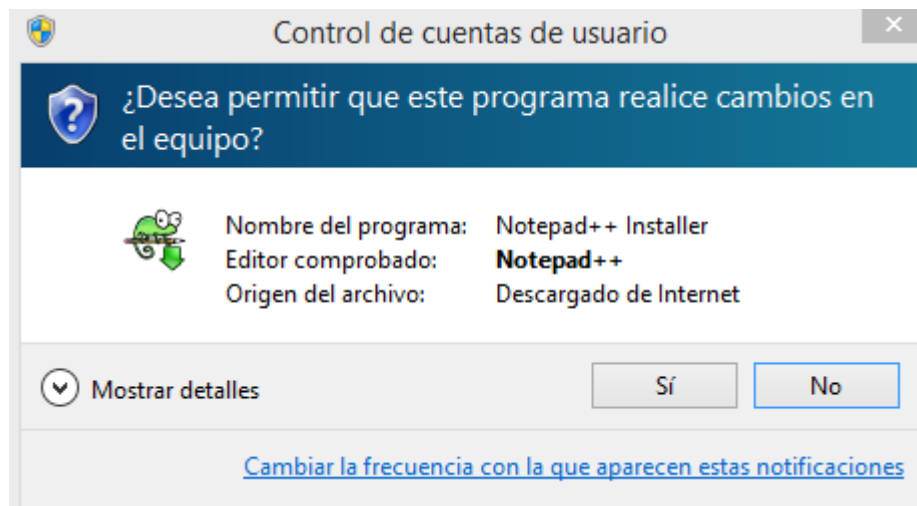


Instalación de notepad programa que nos permite acceder a la manipulación de la programación de las condiciones iniciales.

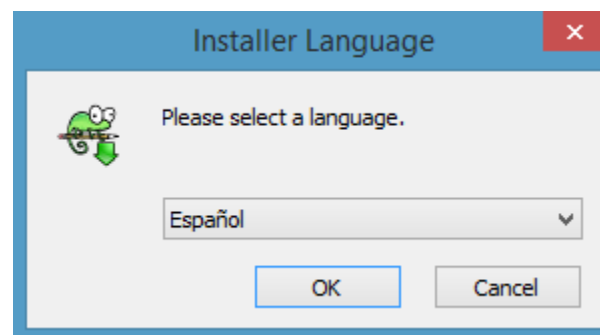
PASOS PARALA INSTALACION

Primero se busca con que sistema operativo se cuenta si 32 bit o 64 bit y luego se procede a instalar, se ejecuta como administrado el notepad.

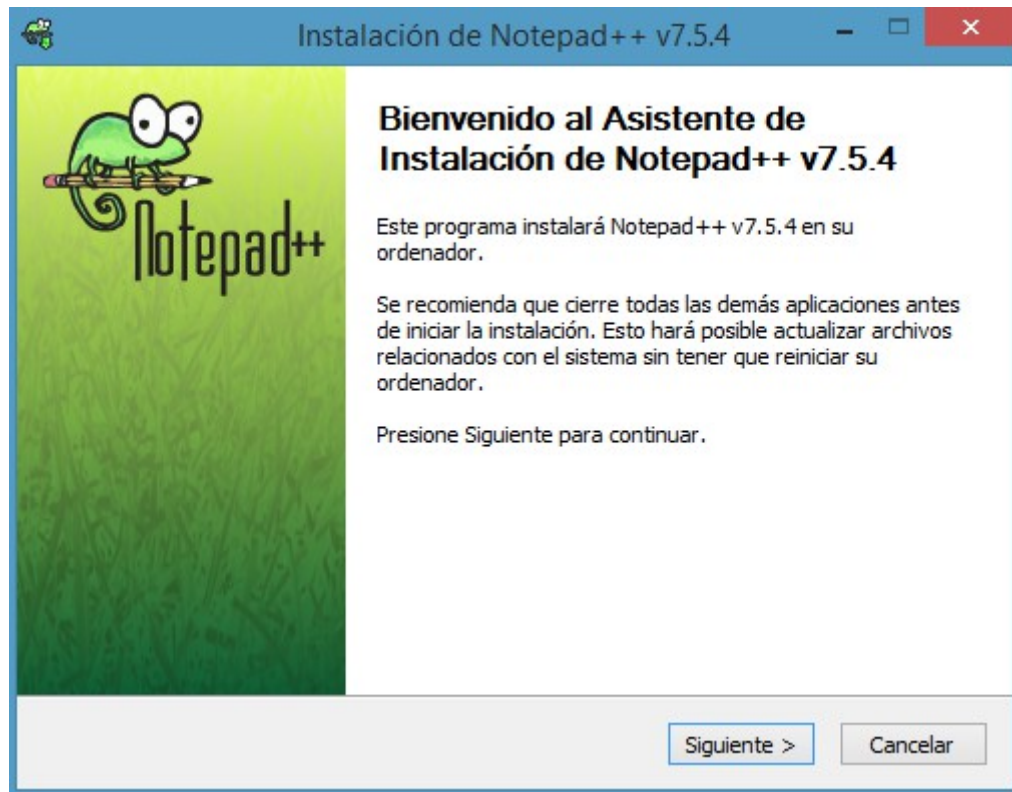
Se le dan permiso para que el programa realice cambios en su computadora y de esta manera continuar con la instalación



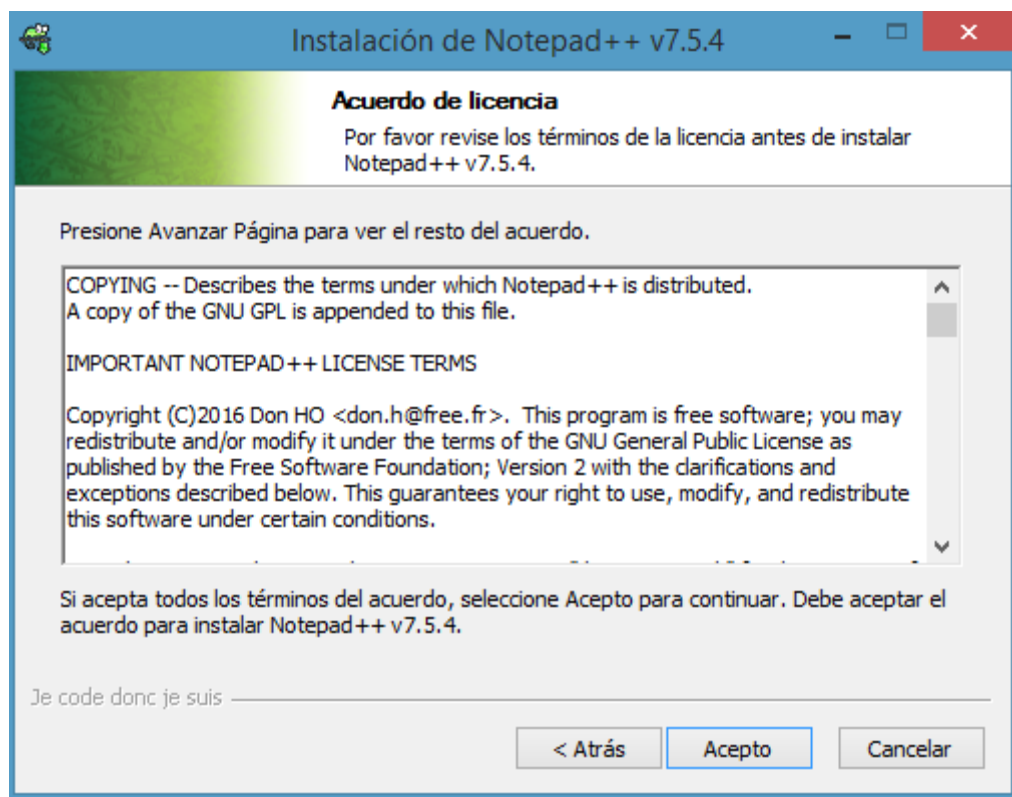
Se hace selección del idioma deseado para la instalación del software.



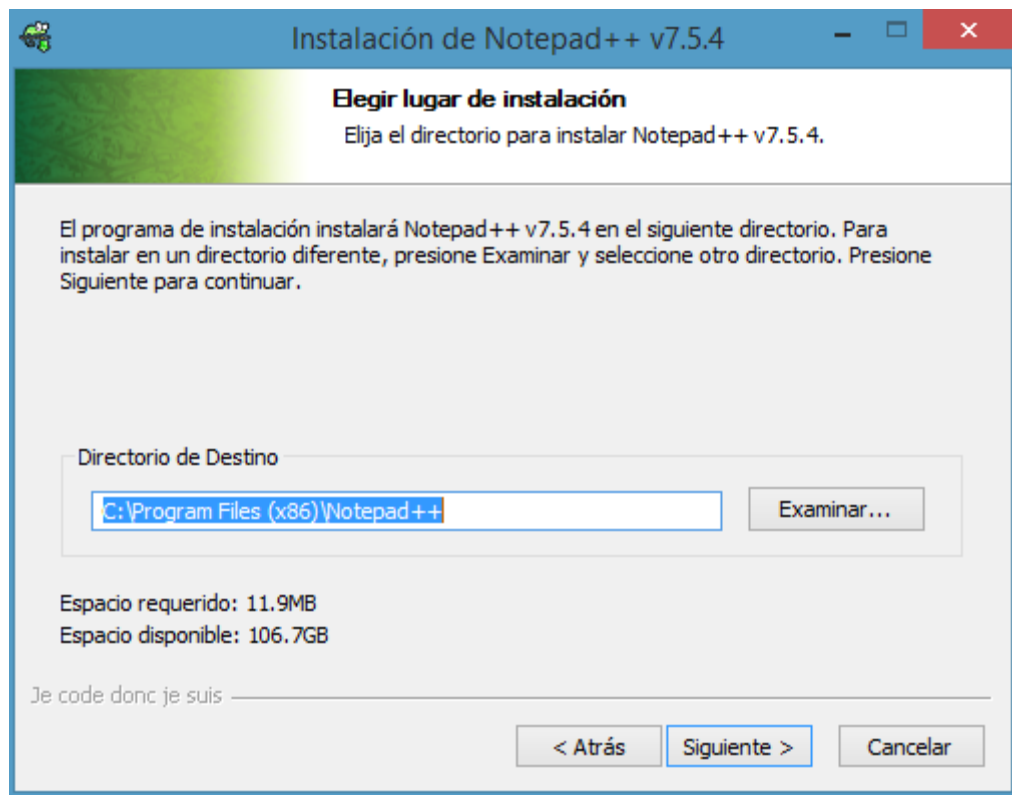
Aparece un mensaje de bienvenida en el cual le damos siguiente para continuar con la instalación



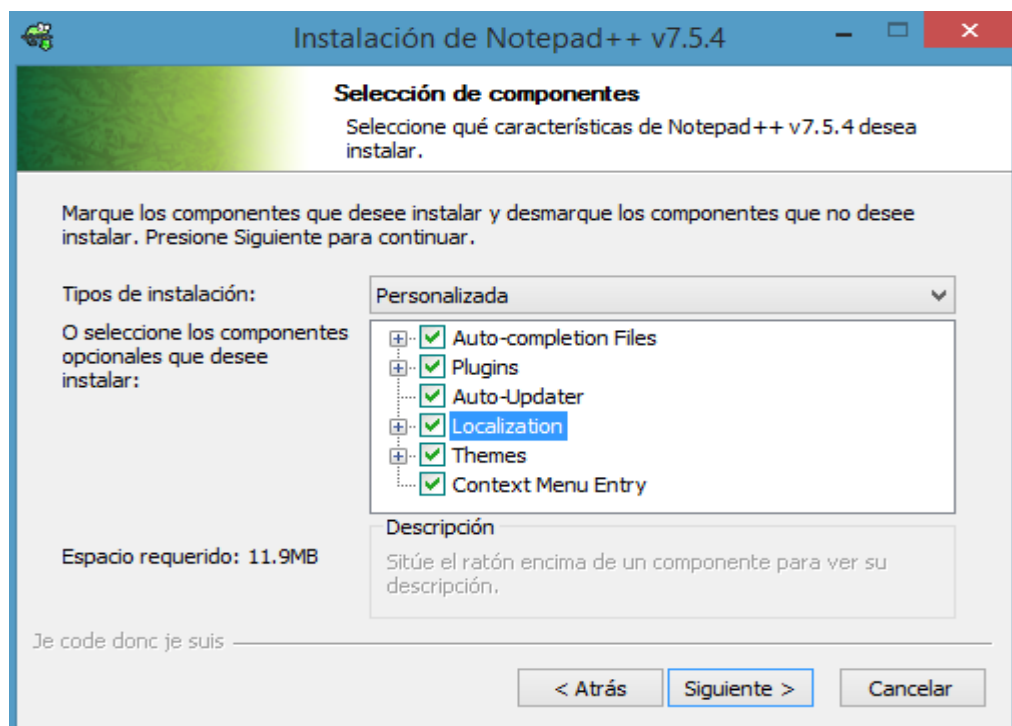
Ahora aparece un acuerdo de licencia al cual se le da aceptar.



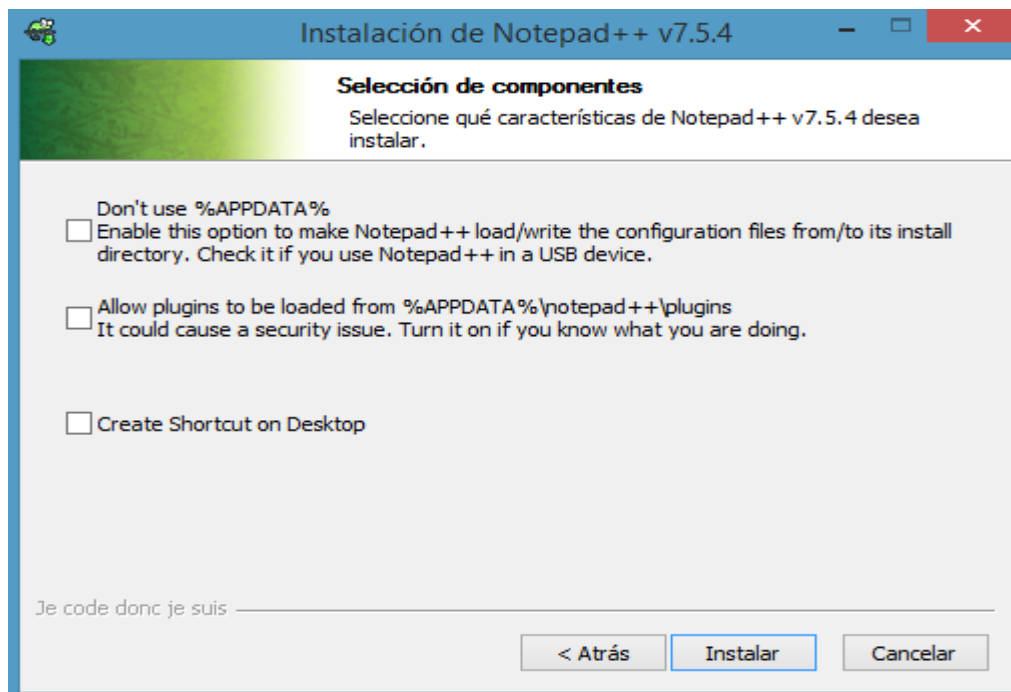
Ahora se elige el lugar que se desea para la instalación del programa, en este caso se dejara la ruta que aparece por defecto y se le da siguiente.



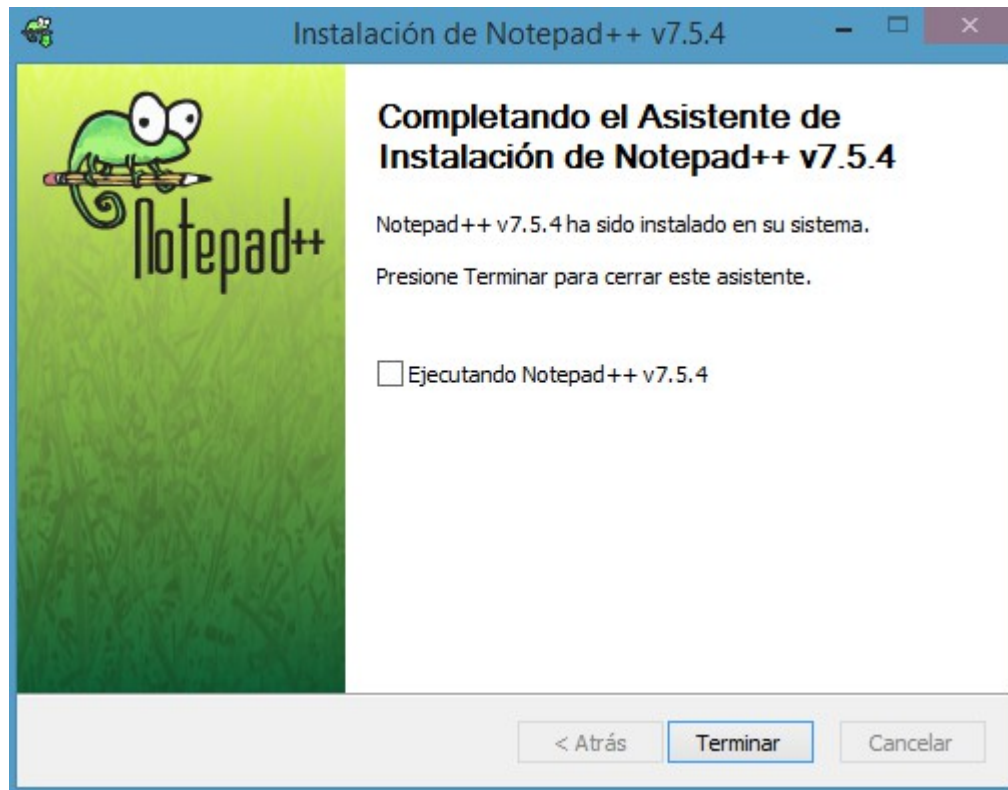
Selección de componentes, se seleccionan todas las casillas disponibles allí presentes y se procede a dar siguiente.



Aparece una nueva ventana de selección de componentes donde no se selecciona ninguna opción y se procede a dar en instalar.



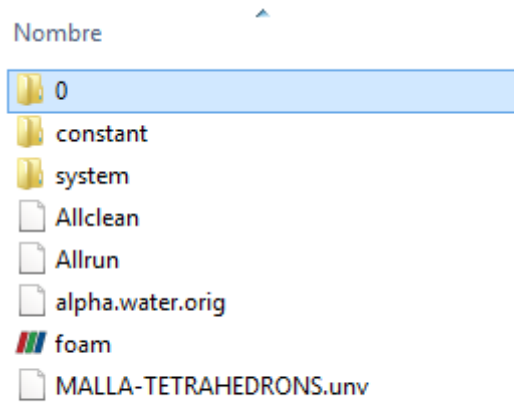
Se deja finalizar la instalación del programa y se desmarca la opción de ejecutar y se procede a finalizar el proceso.



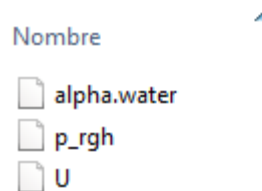
2. CONDICION INICIAL PARA LA VELOCIDAD

Copiar en su computadora la carpeta de canal abierto que se dejara en el cd del manual de usuario y se procede a pegar en la carpeta llamada run la cual es generada en la instalación del software de openfoam, esta carpeta contiene la estructura del caso.

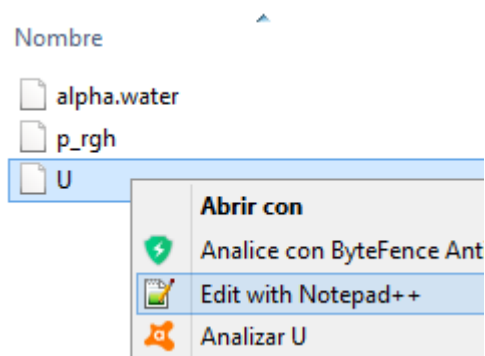
Después de la instalación de los programas anteriores se procede a abrir la carpeta de canal abierto donde se encuentran ubicadas diversas carpetas que contienen las condiciones iniciales de la simulación.



La carpeta 0 contiene los valores iniciales de la presión (p_{rgh}), la velocidad (U) y el α .Water. Dentro de cada una de ellas se procede a darle valores a cada una de las condiciones.



Se procede a la manipulación de la condición inicial de la velocidad, se le da clic derecho al archivo llamado U para seleccionar abrirlo con el notepad instalado.



Estando en el archivo U en el programa de notepad se procede a variar el valor de la velocidad inicial con la que se quiera simular el caso del canal abierto de flujo laminar.

```

1  /*----- C++ -----*/
2  |=====|
3  | \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  | \ \ / O p e r a t i o n | Version: 4.1
5  | \ \ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org
6  | \ \ / M a n i p u l a t i o n |
7  /*-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        volVectorField;
13     location     "0";
14     object       U;
15 }
16 // *****
17
18 dimensions      [0 1 -1 0 0 0];
19
20 internalField   uniform (0 0 0);
21
22 boundaryField
23 {
24     inlet
25     {
26         type      fixedValue;
27         value      uniform (0.586936 0 0);
28     }
29     outlet
30     {
31         type      inletOutlet;
32         inletValue uniform (0 0 0);
33         value      $internalField;
34     }
35     fixedWalls
36     {
37         type      fixedValue;
38         value      uniform (0 0 0);
39     }
40     atmosphere
41     {
42         type      pressureInletOutletVelocity;
43         value      uniform (0 0 0);

```

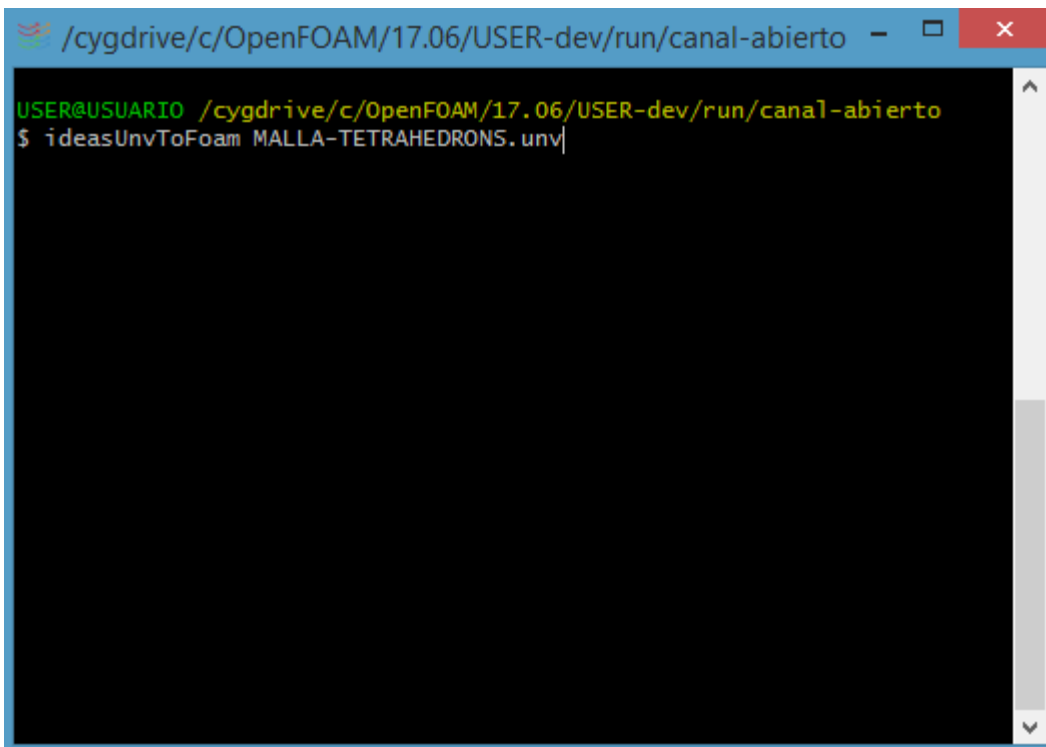
En la imagen anterior se observa que las dimensiones usadas para la velocidad son de $0.586936 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y se aprecia que el valor a modificar para la velocidad es en la condición de entrada del fluido (inlet).

Se guardan los cambios realizados y se procede a ejecutar el software de openfoam instalado en Windows

3. PROCEDIMIENTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE CÓDIGOS EN EL SOFTWARE OPENFOAM

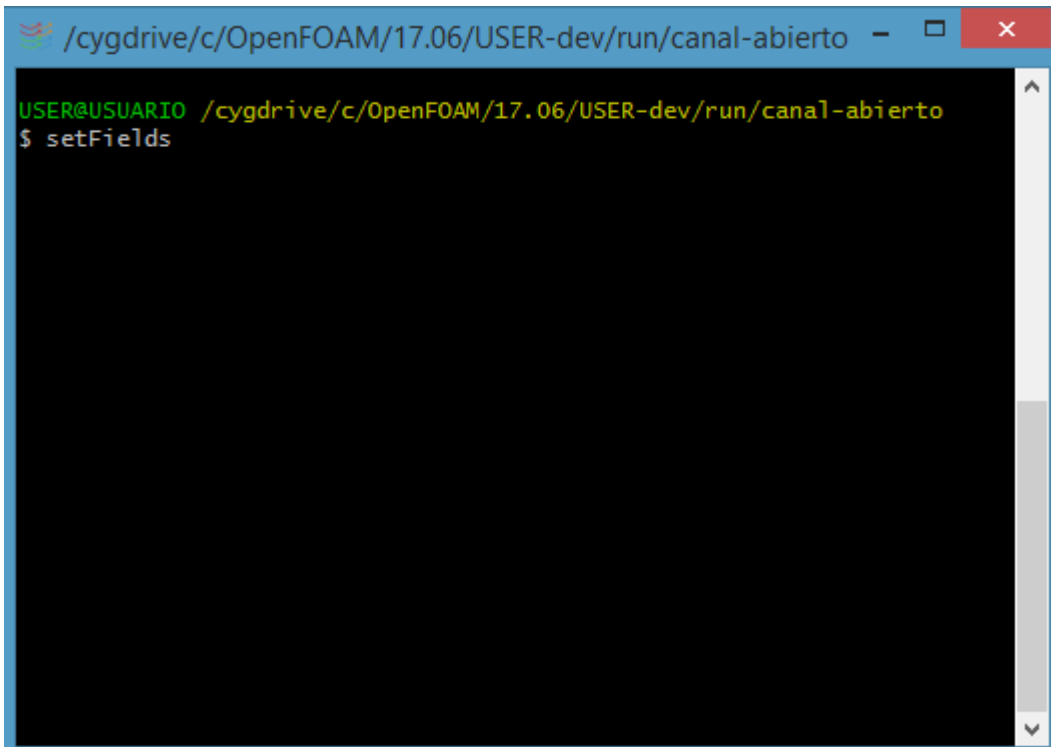
Una vez ejecutado el software de openfoam en Windows Se busca dentro de este la ubicación de la carpeta contenedora de la estructura del caso canal abierto propuesto en la computadora, la cual se encuentra ubicada en este caso en la carpeta run que se generó en la instalación de openfoam.

Se ejecuta el código de ideasUnvToFoam seguido del nombre que tenga la malla en este caso MALLA-TETRAHEDRONS.unv para transferir del formato unv generada en el Software de salome al formato de foam con el fin de crear dentro de la carpeta constant una nueva carpeta llamada polyMesh la cual contiene la malla con las condiciones diseñadas.



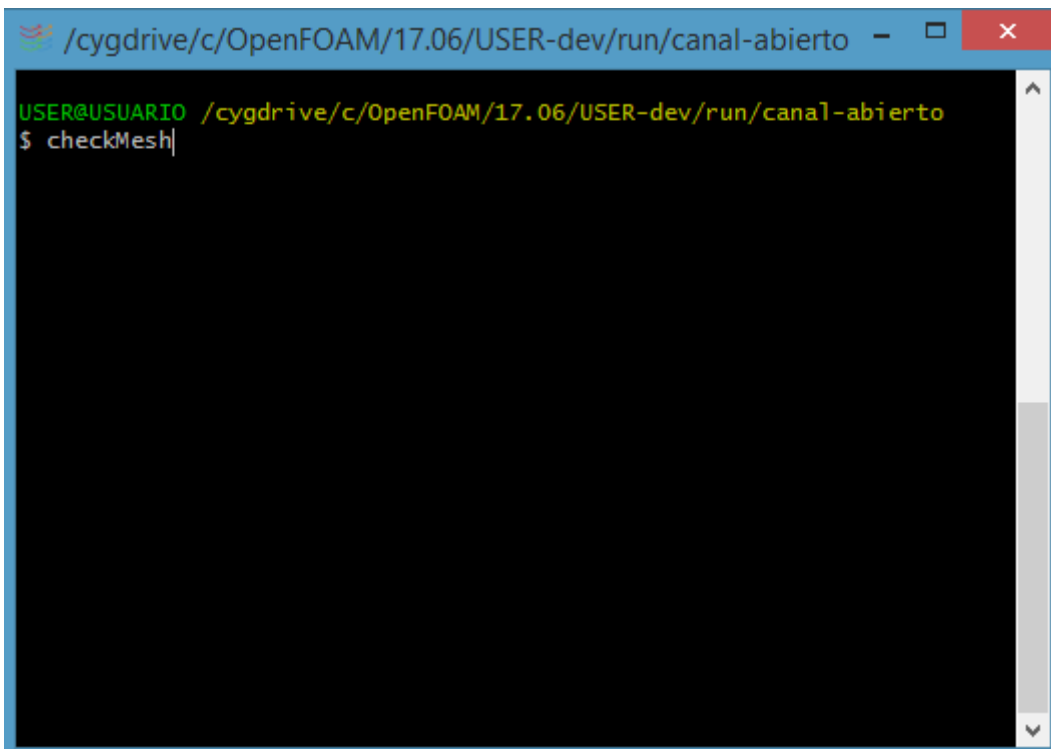
```
/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto - [X]  
USER@USUARIO /cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
$ ideasUnvToFoam MALLA-TETRAHEDRONS.unv|
```

Se ejecuta el código de setFields para adaptar las condiciones de inicio.



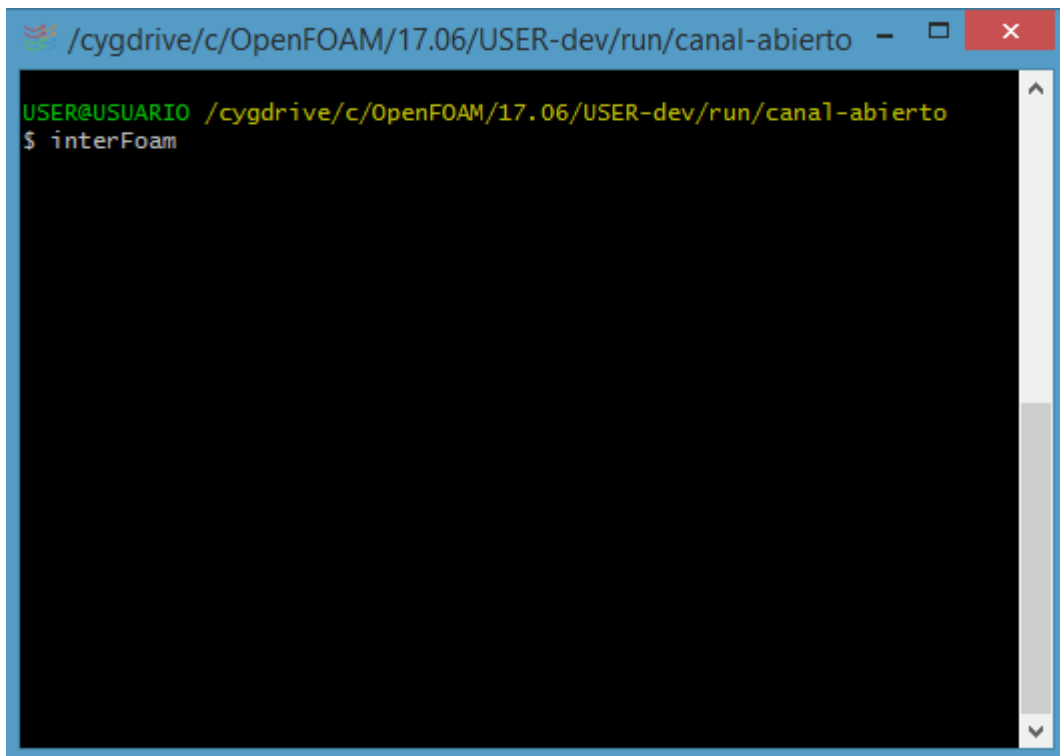
```
/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto - □ ×  
USER@USUARIO /cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
$ setFields
```

Se ejecuta el código de checkMesh para hacer una verificación de la malla y constatar que no se presente error alguno en su diseño.



```
/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto - □ ×  
USER@USUARIO /cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
$ checkMesh|
```

Se ejecuta el código del solucionador (interFoam) a utilizar en el caso y se deja correr el software hasta que finalice el proceso.



```
/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto - □ ×  
USER@USUARIO /cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
$ interFoam
```

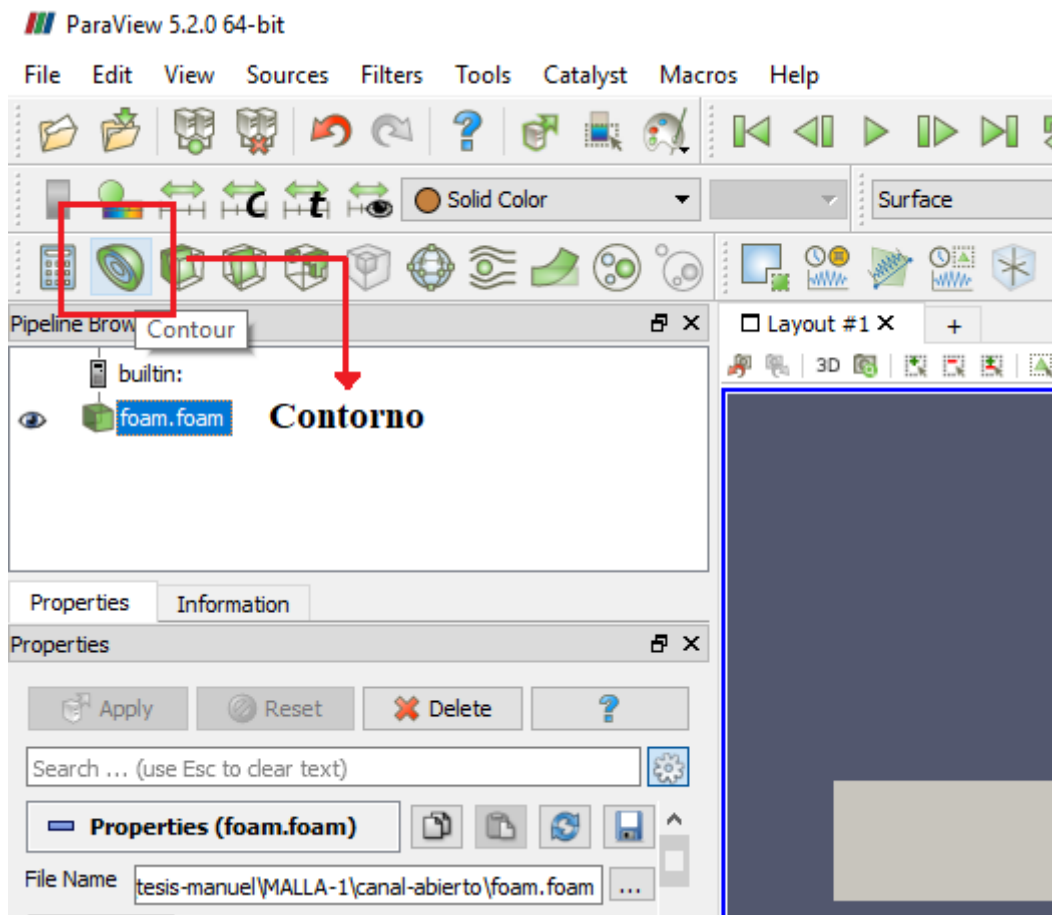
Se ejecuta el código de paraFoam para visualizar los valores obtenidos de la simulación en el software de paraView.



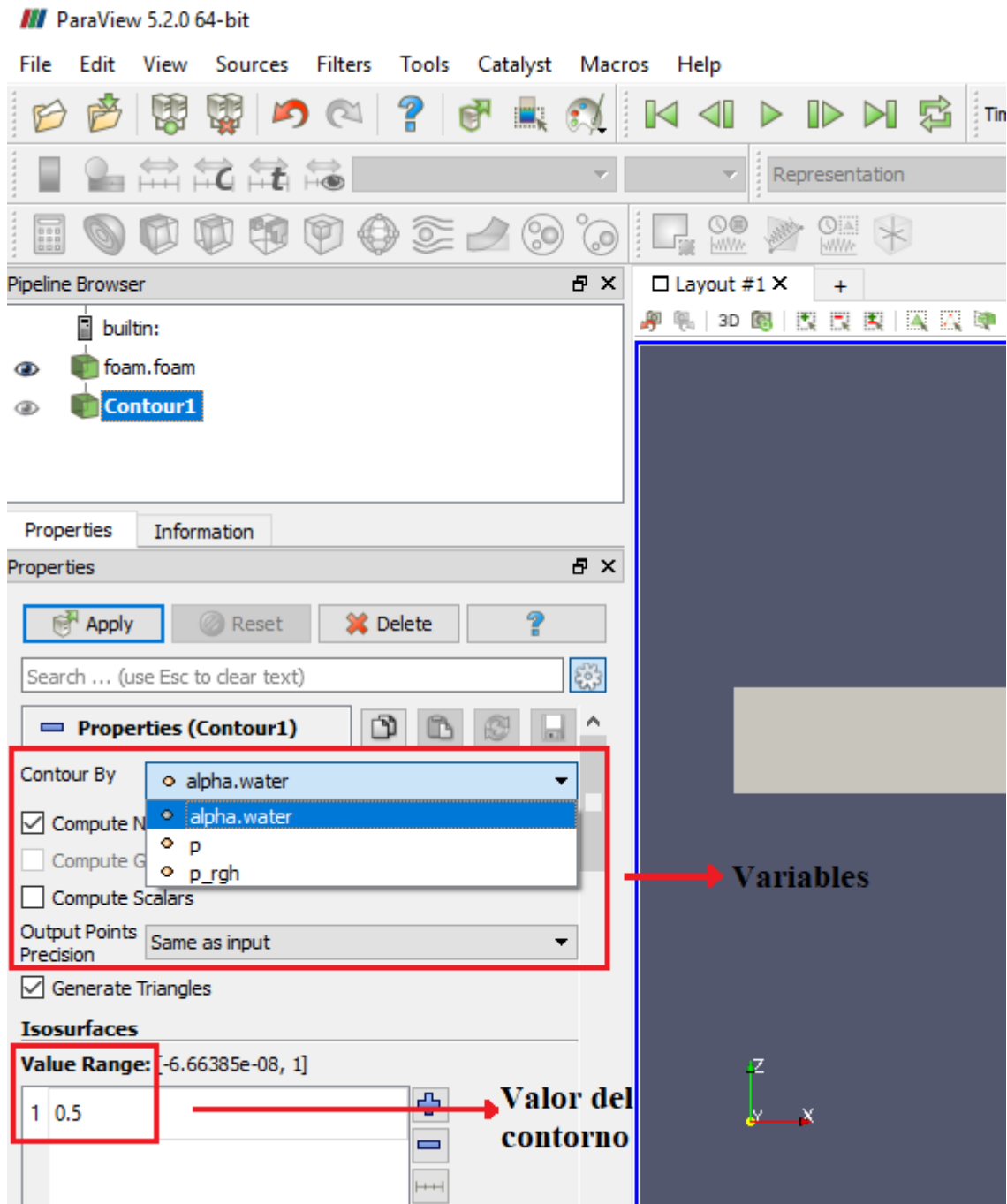
```
/cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto - □ ×  
USER@USUARIO /cygdrive/c/OpenFOAM/17.06/USER-dev/run/canal-abierto  
$ paraFoam  
Created temporary 'canal-abierto.foam'
```

4. VISUALIZACION DE LA SIMULACION EN EL SOFTWARE DE PARAVIEW

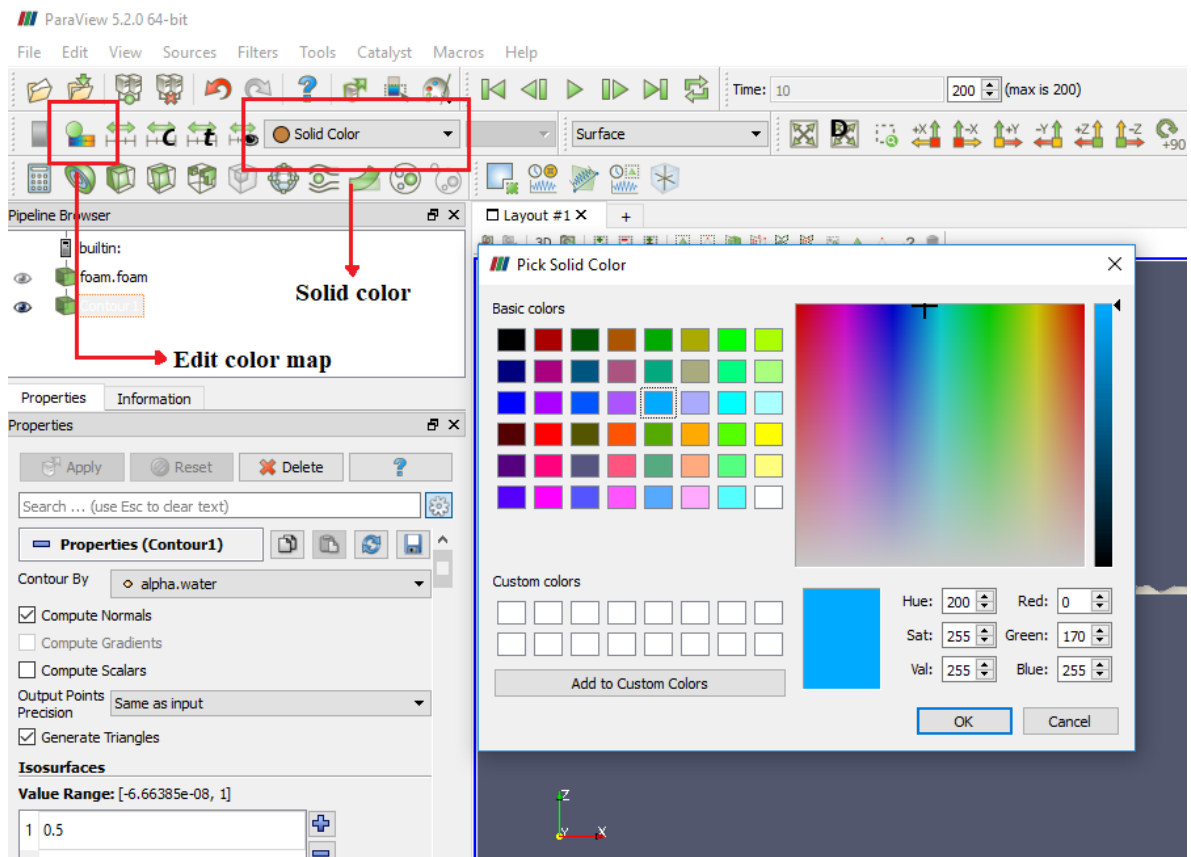
En la parte superior izquierda de la pantalla se le da contour para generar los contornos en el fluido y las presiones.



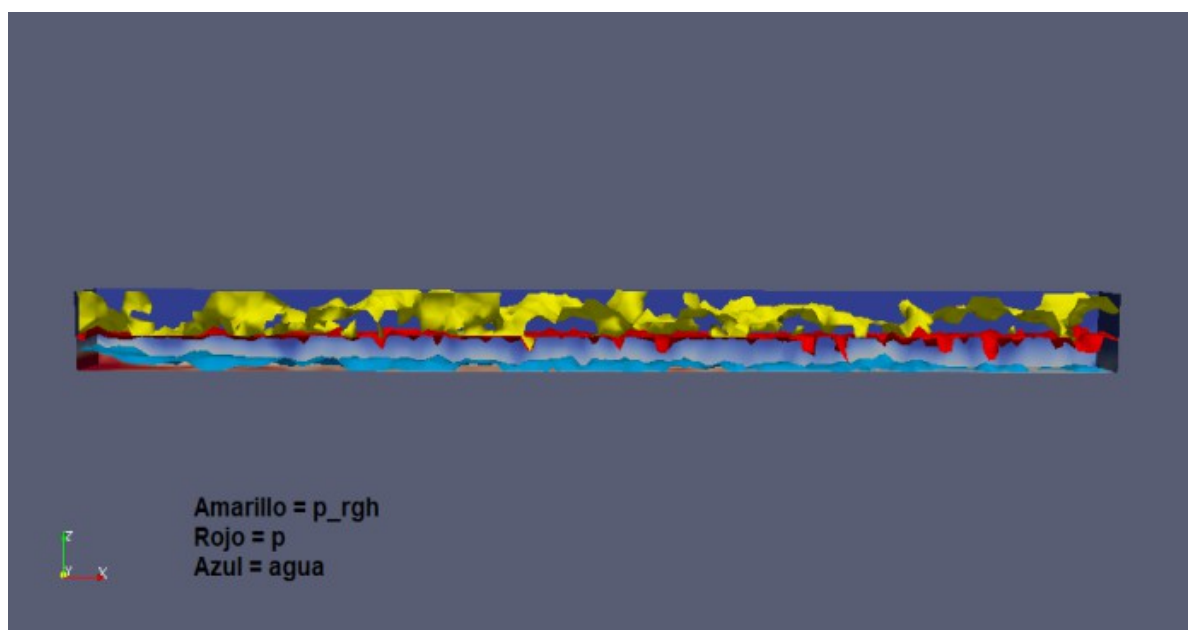
Se selecciona la variable a la que se dese aplicar el contorno y se le da un valor de 0.5 y se le da Apply.



Luego se selecciona solid color y edit color map en la parte superior izquierda de la pantalla para cambiar el color del solido que tendrá el contorno, este mismo paso se puede realizar con las demás variables.

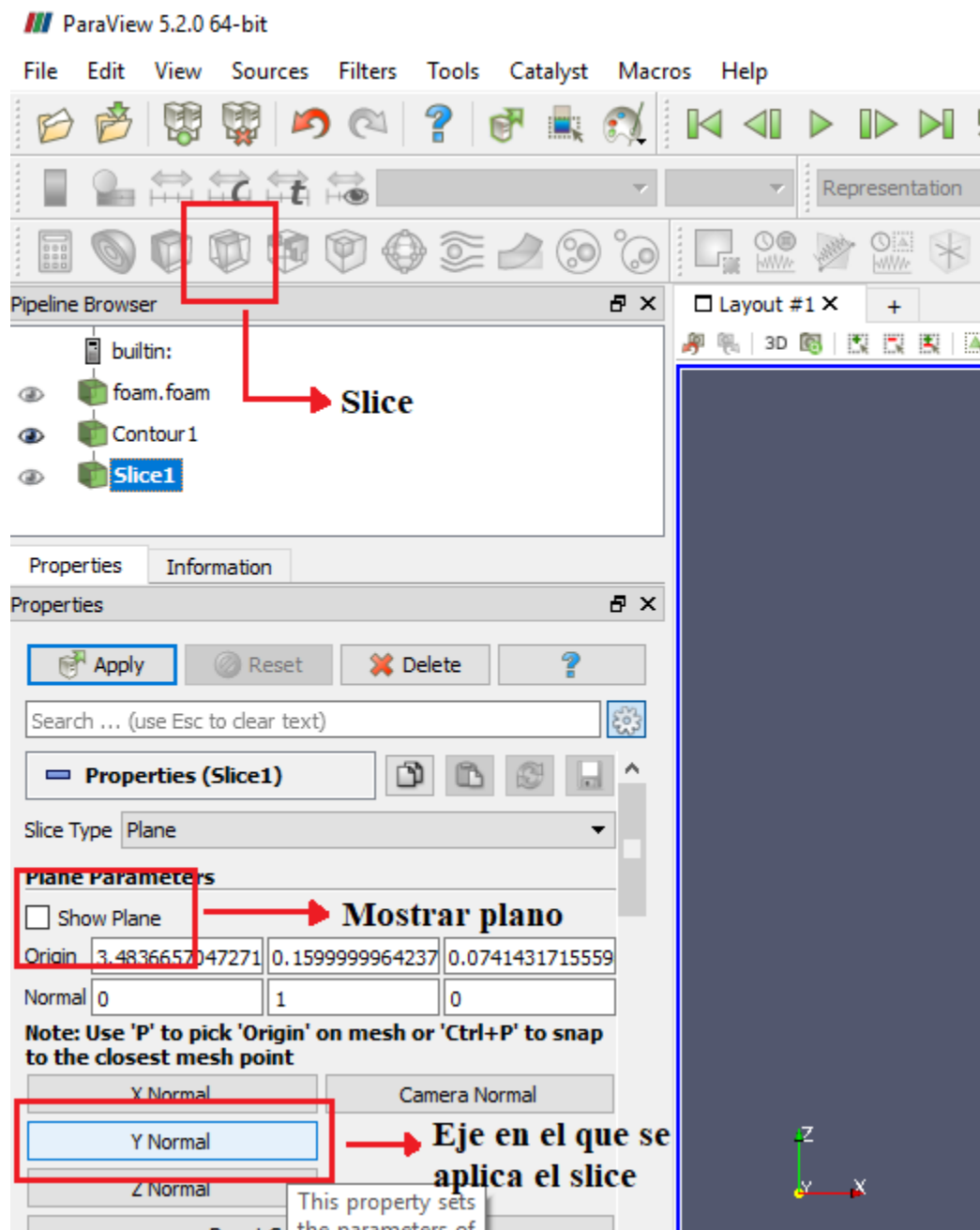


simulación finalizada con los contornos en las variables de p_{rg} , p y U .

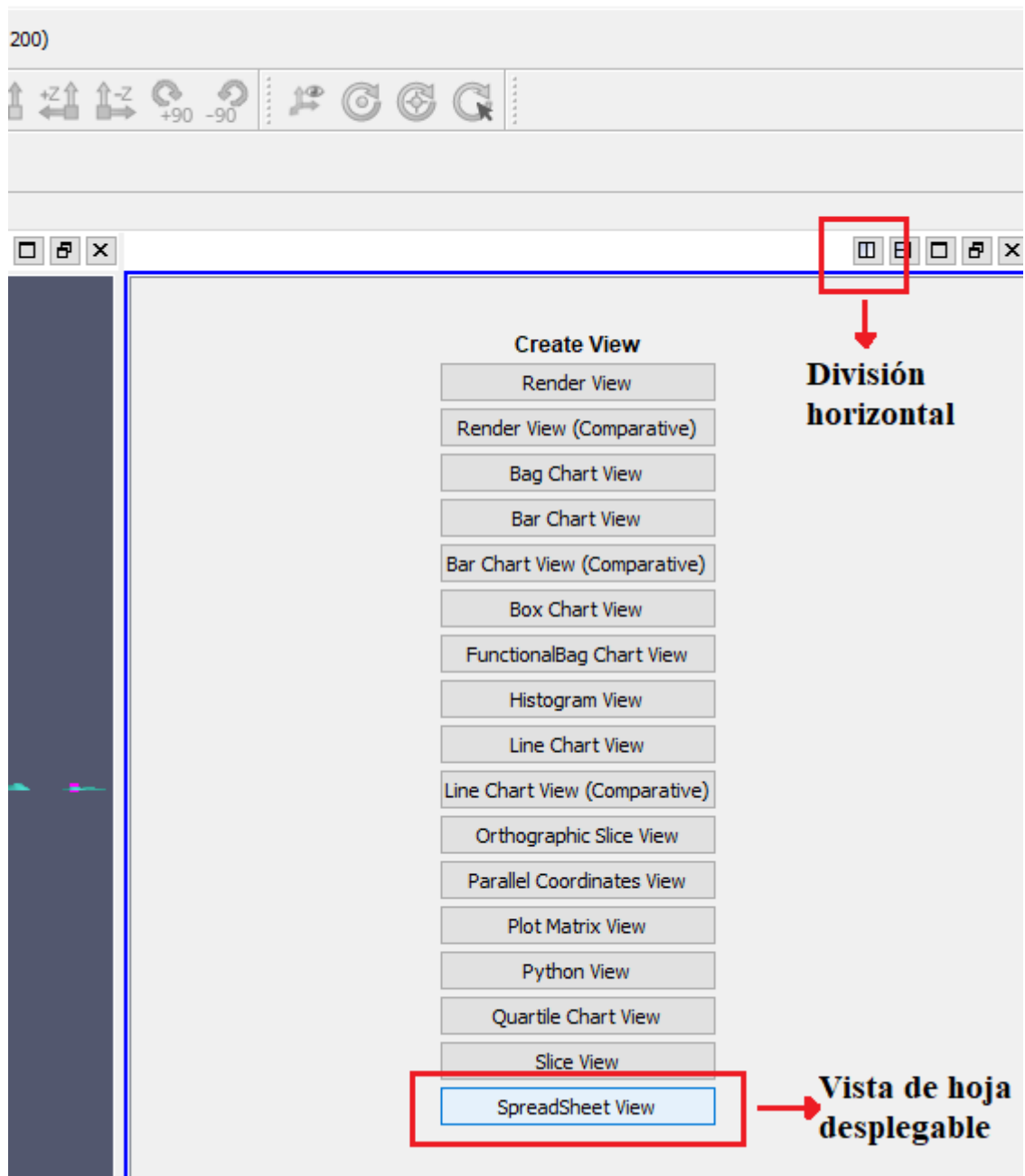


Dejando atrás la breve explicación que hace ver más atractiva la simulación se procede a mostrar como exportar los datos a Excel, primero se genera un slice en el eje Y y se desmarca show plane y por ultimo apply, esto se hace con el fin de reducir los datos de la

simulación en una sola línea y de este modo sea más fácil la búsqueda de los valores del punto seleccionado.



con el slice ya creado nos vamos a la parte superior derecha de la pantalla donde dice Split horizontal y luego en el panel que se abre se procede a dar clic donde dice Spreadsheet View para lograr apreciar los datos que arrojó la simulación.



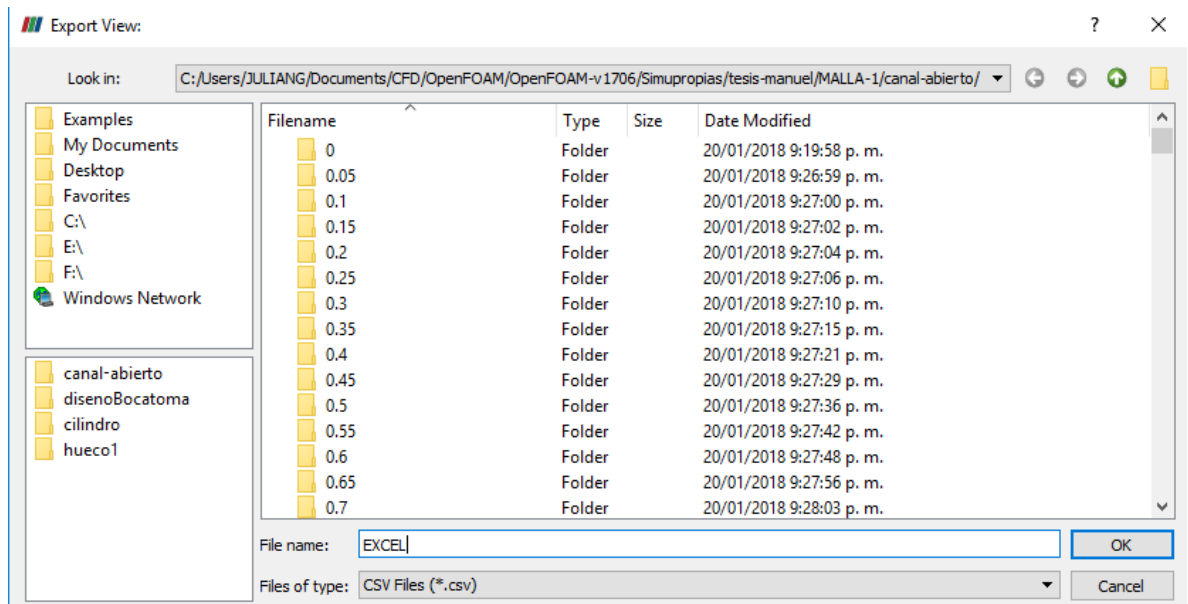
Ahora bien estando en los datos arrojados en la simulación se proceden a exportar en Excel de la siguiente manera:

Primero en la parte superior del spreadSheet view o hoja desplegable se selecciona la opción de export spreadSheet

Showing **Slice 1** Attribute: **Point Data** Precision: **6**

	Block Number	Point ID	Normals				
0	1	0	0.183221	-0.239808	0.951484	2.32316	0.16
1	1	1	0.0170677	-0.175743	0.973013	2.32943	0.16
2	1	2	0.149439	-0.185689	0.967057	2.30179	0.16
3	1	3	-0.0559006	0.025252	0.997498	1.1469	0.16
4	1	4	-0.00550845	0.0324187	0.999323	1.18728	0.16
5	1	5	-0.0724548	0.0407388	0.996245	1.12526	0.16
6	1	6	0.0790484	0.0218899	0.996563	0.187397	0.16
7	1	7	0.0794987	0.0219065	0.996525	0.189585	0.16
8	1	8	-0.00630886	-0.0982672	0.993591	2.05815	0.16
9	1	9	0.112075	-0.0495434	0.990305	2.07858	0.16
10	1	10	0.0112832	-0.0593793	0.993643	2.03862	0.16
11	1	11	-0.0106401	-0.115307	0.974366	1.93913	0.16
12	1	12	0.0109771	-0.193482	0.968422	1.96818	0.16
13	1	13	0.0130188	-0.15654	0.981242	1.98374	0.16
14	1	14	0.100712	0.0016247	0.973770	1.24042	0.16

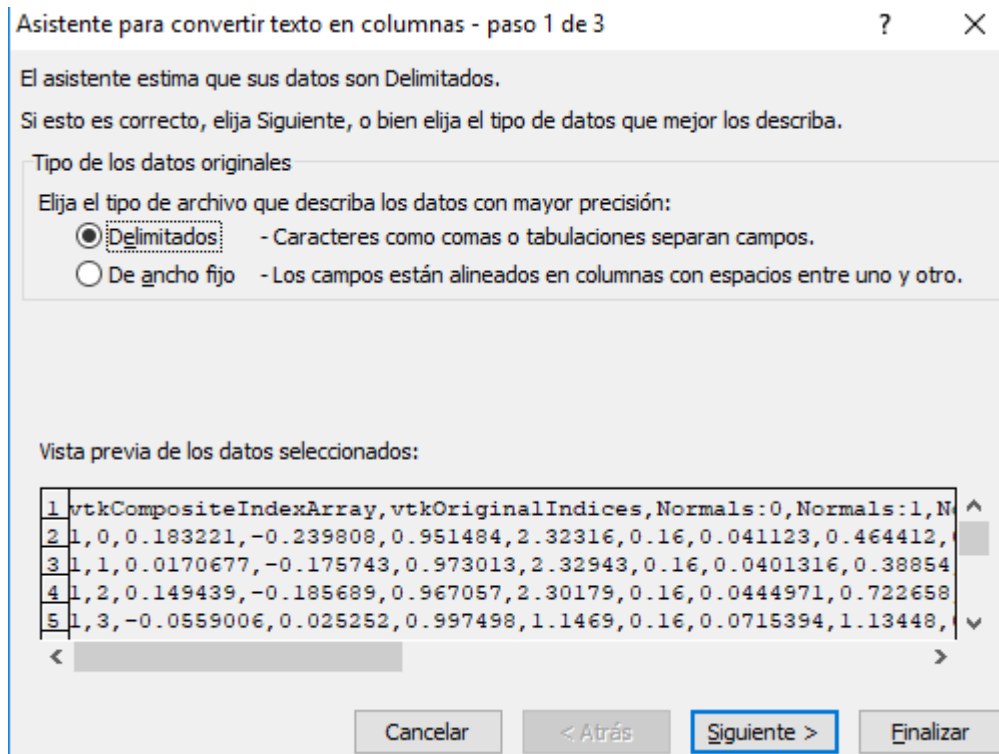
segundo se le da nombre al archivo en formato CSV files y se guarda donde se dese recomendación dejarla la ruta donde se guarda por defecto y se le da guardar.



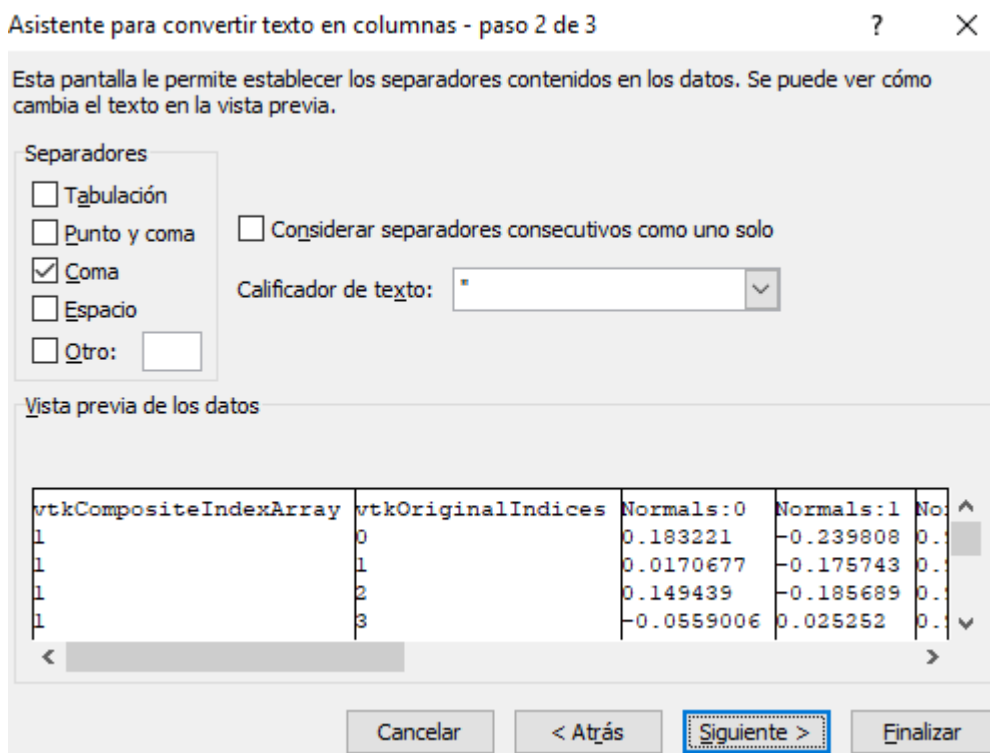
Tercero se busca la ruta donde se guardó el documento anterior y se procede a abrir.

Estando con el documento abierto en Excel se procede a seleccionar una columna, luego vamos a la parte superior y buscamos donde diga datos, luego donde dice columnas y se nos abre un nuevo panel en el cual se cambiara el diseño para la visualización de los datos.

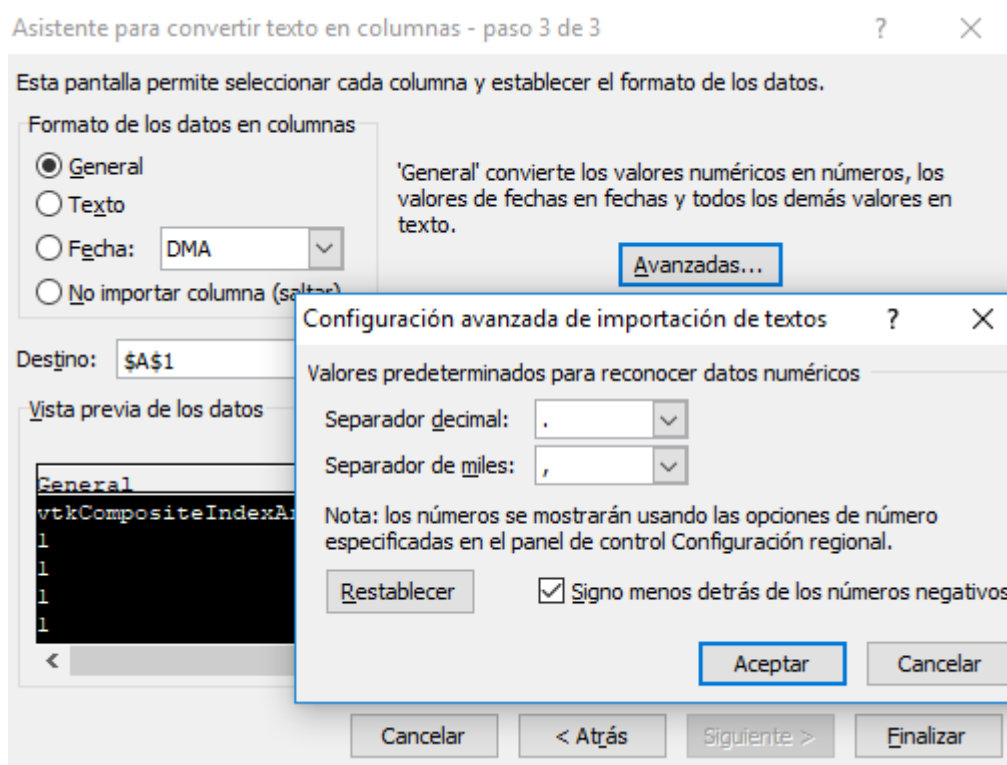
Como paso 1 en este panel se selecciona delimitados y se procede a dar en siguiente para continuar con los paso.



Como paso 2 se desmarca la casilla de separadores tabulación y se marca la casilla de coma, luego se le da siguiente.



Como paso 3 se le da en configuración avanzada para cambiar el separador decimal por coma y el separador de miles por puntos, se procede a dar siguiente y luego finalizar.



Por último se le da guardar como para guardar los cambios realizados en formato Excel y de este modo queda modificado el archivo en formato Excel y facilitar la búsqueda de los puntos que se quieran analizar.

