



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelación numérica del flujo y comportamiento del Sifón
Piura utilizando Ansys**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Xavier Fernando Montalvan Portero

Asesor(es):

**Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar
Ing. Luis Angel Noblecilla Palomino**

Piura, junio de 2021



Esta tesis está dedicada a Dios, a la Virgen, a mi familia quienes me aconsejaron y apoyaron durante toda mi etapa de estudios universitarios y realización de este proyecto de tesis y a todas esas maravillosas personas que dedicaron parte de su tiempo aconsejándome y preocupándose para que pudiera lograr mis metas.





Resumen Analítico-Informativo

Modelación numérica del flujo y comportamiento del Sifón Piura utilizando Ansys
Xavier Fernando Montalvan Portero.

Asesor(es): Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar; Ing. Luis Angel Noblecilla Palomino.
Tesis.

Ingeniero Civil.

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, junio de 2021.

Palabras claves: Sifón/ Ansys CFX/ modelación/ correntómetro/ canal/ Piura.

Introducción: En la actualidad, el complemento de un modelo numérico se encuentra en los modelos físicos, los cuales también son usados para estudiar el comportamiento de un flujo, creando mejores diseños e incluso optimizar la estructura. El sifón Piura es una estructura real en operación, sobre el cual se extrajo la mayor cantidad de información como fuese posible, como: planos de la estructura, data histórica, aforos de campo, cálculos matemáticos; que fueran sustento para la construcción del modelo del sifón utilizando el programa de modelación numérica llamado Ansys. El propósito de esta tesis es contar con una herramienta confiable y viable para diseños hidráulicos que garantice la mayor eficacia en la captación del agua y permita el abastecimiento de las zonas urbanas y agrícolas.

Metodología: Se realizará la evaluación de distintas variables que influyen sobre el flujo del agua y el comportamiento del sifón Piura. Serán 3 tipos de métodos: el método analítico, el método experimental y el método de modelación numérica. Se analizará, comparará y discutirá los resultados del método analítico, iniciando con una verificación en el diseño del sifón Piura y comprobando que cumple con los requisitos hidráulicos necesarios. También se analizará un método experimental frente a los resultados del modelo numérico, dándole así validez a la modelación en Ansys. El software elegido para el estudio del modelo numérico fue Ansys CFX, el cual entrega mayor facilidad sobre el análisis de los fluidos.

Resultados: Los resultados de la simulación en Ansys, nos permite observar zonas del sifón que son inaccesibles. Estas zonas son mostradas a través de gráficos de líneas de flujo, perfil de velocidades o de presiones, los cuales identifican los parámetros del flujo de agua. Además, Ansys, es capaz de hacer una simulación real de la estructura, por medio del análisis transitorio, en el cual se logra ver el flujo de agua en movimiento y conocer cómo se comporta la estructura en la realidad. Por otro lado, parámetros como: caudal, velocidad, pérdidas hidráulicas, etc, obtenidos en el método analítico y experimental, son base importante que nos ayude a comprobar que nuestra modelación se comporta como el modelo real del sifón.

Conclusiones: La validez del diseño hidráulico a través de la modelación numérica, se logra mediante la comparación de los resultados obtenidos por los tres métodos, permitiendo un mayor entendimiento sobre el comportamiento hidráulico de la estructura en estudio. También de tener la disponibilidad del modelo en cualquier momento como una herramienta complementaria de prevención frente a cambios que puedan afectar el comportamiento del sifón.

Fecha de elaboración del resumen: 10 de mayo de 2021.

Analytical-Informative Summary

**Modelación numérica del flujo y comportamiento del Sifón Piura utilizando Ansys
Xavier Fernando Montalvan Portero.**

**Asesor(es): Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar; Ing. Luis Angel Noblecilla Palomino.
Tesis.**

Ingeniero Civil.

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, junio de 2021.

Keywords: Siphon/ Ansys CFX/ modeling/ current meter/ channel/ Piura.

Introduction: Recently, the complement of a numerical model is found in physical models, which are used to study the behavior of a flow, creating better designs and optimizing the structure. Piura siphon is a real structure in operation, which it was extracted the most information as possible, such as: plans of the structure, historical data, field tests, mathematical calculations; that there was sustenance for the construction of the siphon model using the numerical modeling program called Ansys. The purpose of this thesis is to have a reliable and viable tool for hydraulic designs that it certifies the greatest efficiency in the collection of water and allows the supply of urban and agricultural areas.

Methodology: It will do the evaluation of different variables that influence on flow of water and the behavior of the Piura siphon. There will be 3 types of methods: the analytical method, the experimental method and the numerical modeling method. It will begin with a verification of the design of the Piura siphon and verify that it keeps the necessary hydraulic requirements. The results of the analytical and experimental method will be analyzed, compared and discussed against the results of the numerical model; thus, it will validate Ansys modeling. The software chosen for the study of the numerical model is Ansys CFX, which allows the analysis of fluids, allowing to develop more easily and quickly, in order to represent real data with high precision.

Results: The results of the simulation in Ansys, allows us to see areas of the siphon that are inaccessible. These zones are shown through flow line graphs, velocity or pressure profiles, which identify the parameters of the water flow. Also, Ansys allows to make a real simulation of the structure, through of the transitory analysis, in which it is possible to see the flow of water in movement and know how the structure behaves in reality. On the other hand, parameters such as: mass flow, speed, hydraulic losses, etc., obtained in the analytical and experimental method, are an important bases that helps us to verify that our modeling behaves like the real siphon model.

Conclusions: The validity of the hydraulic design through numerical modeling is achieved by comparing the results obtained for the three methods, allowing a better understanding about the hydraulic behavior of the structure on study. Also, if it is available the model at any time, it will be a complementary prevention tool against changes that may affect the behavior of the siphon.

Summary date: May 10th, 2021.

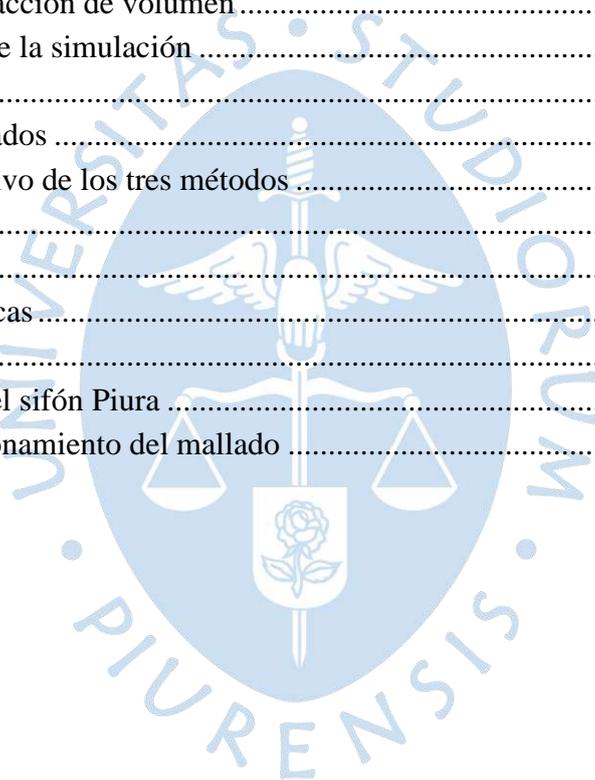
Tabla de contenido

Introducción	1
Capítulo 1	3
Los sifones.....	3
1.1. Definición.....	3
1.2. Tipos de sifones y su funcionamiento.....	3
1.2.1. Sifón normal	3
1.2.2. Sifón invertido	4
1.3. Ventajas y desventajas	4
1.4. Tipos de sifones invertidos.....	5
1.5. Criterios de diseño.....	6
1.6. Partes del sifón invertido.....	8
1.7. Hidráulica del sifón invertido.....	9
1.8. Tuberías de presión	13
1.8.1. Velocidades en el conducto	13
1.8.2. Material del conducto	13
1.8.3. Especificaciones para la cobertura del conducto	14
1.9. Elección del diámetro de la tubería	14
1.10. Cantidad necesarias de aberturas	15
1.11. Verificación del ahogamiento.....	15
1.12. Mantenimiento del sifón	16
Capítulo 2	19
El Sifón del río Piura.....	19
2.1. Fases del Proyecto Especial Chira Piura	19
2.2. Sistema de Medio y Bajo Piura	20
2.3. Interdisciplinaridad.....	21
2.4. El sifón del río Piura.....	22
2.4.1. Antecedentes.....	22
2.4.2. Localización y accesos	23
2.5. Canal Biaggio Arbulú.....	24
2.5.1. Características del canal.....	24
Capítulo 3	31
Diseño del sifón Piura	31
3.1. Diseño del sifón.....	31

3.2. Cálculo hidráulico del sifón	34
3.2.1. Cálculo de pérdidas y carga hidráulica	34
3.2.2. Cálculo de las presiones.....	40
Capítulo 4	43
Instrumentos de medición del flujo de agua para el sifón Piura	43
4.1. Aforo en el canal	43
4.1.1. Características de la sección de aforo	43
4.1.2. Instrumentos hidrométricos	44
4.1.3. Métodos para aforar	44
4.2. Correntómetro	45
4.2.1. Aforo con correntómetro	46
4.2.2. Método 0.6d	48
4.2.3. Método de la medición sub-superficial.....	49
4.3. Método del flotador.....	49
4.3.1. Características de un flotador	49
4.3.2. Aplicaciones del método.....	50
4.3.3. Procedimiento del método	50
4.4. Cálculos y resultados.....	52
4.4.1. Cálculos con correntómetro	52
4.4.2. Cálculos con flotadores.....	58
4.4.3. Discusión de resultados	59
Capítulo 5	61
Los modelos numéricos.....	61
5.1. Dinámica de fluidos computacional – CFD	61
5.1.1. Comportamiento básico de los fluidos.....	61
5.1.2. Descripción general	62
5.1.3. Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional	63
5.1.3.1. Sistema o volumen de control	63
5.2. Métodos numéricos	64
5.2.1. Método de discretización	64
5.2.1.1. Método de volúmenes finitos	64
5.2.2. Criterio para fin de convergencia.....	64
5.2.3. Propiedades.....	65
5.2.3.1. Consistencia	65
5.2.3.2. Estabilidad.....	65
5.2.3.3. Convergencia.....	66
5.3. Modelos numéricos	66
5.3.1. Características.....	66
5.3.2. Tipos de modelos numéricos	67
5.3.2.1. Dimensionalidad.....	67
5.3.2.2. Método de cálculo	68
5.3.2.3. Regímenes de flujo.....	69

5.3.2.4. Variación en el tiempo	69
5.4. Turbulencia	70
5.4.1. Ecuaciones de Navier-Stokes.....	70
5.4.2. Descripción física de un fenómeno.....	72
5.4.3. Modelos de turbulencia.....	73
5.4.3.1. DNS (Direct Numerical Simulation).....	74
5.4.3.2. SRS (Scale Resolving Simulation).....	74
5.4.3.3. RANS (Reynolds – Averaged Navier Stokes)	75
5.4.3.4. Standard k- ϵ	78
5.4.3.5. Standard k- ω	79
5.4.3.6. SST	80
5.4.4. Ecuaciones Reynolds - Averaged Navier Stokes (RANS)	81
5.4.5. Número de Reynolds	82
5.5. Modelo VOF	83
5.5.1. Limitaciones del modelo VOF.....	83
5.5.2. Modelo no homogéneo y homogéneo.....	84
5.5.3. Ecuación de fracción de volumen.....	85
5.6. Malla numérica.....	85
5.6.1. Mallas estructuradas	85
5.6.2. Mallas no-estructuradas	86
5.6.3. Mallas híbridas.....	86
5.7. Ecuaciones de transporte.....	87
5.7.1. Transporte de masa.....	88
5.7.2. Transporte de momentum.....	88
5.7.3. Transporte de calor	90
5.8. ANSYS CFX	91
5.8.1. Introducción.....	91
5.8.2. Pre proceso.....	92
5.8.2.1. Geometría.....	92
5.8.2.2. Malla.....	93
5.8.2.3. Propiedades del fluido y condiciones de borde.....	94
5.8.3. Procesamiento.....	95
5.8.4. Post proceso	95
Capítulo 6.....	97
Modelación del sifón con Ansys CFX	97
6.1. Ansys Workbench	97
6.2. Esquema del proyecto: Preprocesamiento	98
6.2.1. Geometría.....	98
6.2.1.1. Digitalización de planos.....	98
6.2.1.2. Creación de la estructura hidráulica	98
6.2.2. Mallado.....	100
6.2.2.1. Creación de malla.....	100

6.2.2.2. Condiciones de borde	112
6.2.3. Configuración	115
6.2.3.1. Generación del dominio	115
6.2.3.2. Configuración del tipo de análisis	118
6.2.3.3. Configuración de las condiciones de borde.....	127
6.3. Esquema del proyecto: Procesamiento.....	135
6.3.1. Criterio de convergencia.....	136
6.4. Esquema del proyecto: Postprocesamiento	141
6.4.1. Resultados de la simulación.....	141
6.4.1.1. Velocidades de flujo.....	142
6.4.1.2. Presiones.....	144
6.4.1.3. Líneas de corriente	146
6.4.1.4. Fracción de volumen.....	147
6.4.2 Animación de la simulación	149
Capítulo 7	153
Comparación de resultados	153
7.1. Resumen cuantitativo de los tres métodos	153
Conclusiones	159
Recomendaciones.....	163
Referencias bibliográficas	165
Apéndices.....	169
Apéndice A - Planos del sifón Piura	171
Apéndice B - Dimensionamiento del mallado	173



Lista de tablas

Tabla 1. Criterios para diseño del canal.	24
Tabla 2. Parámetros para el diseño del canal.	31
Tabla 3. Características del canal.	32
Tabla 4. Características del sifón.	32
Tabla 5. Pérdidas por codos en cada tramo del sifón.	36
Tabla 6. Valores de “Ke”	36
Tabla 7. Valores de “e” para distintos materiales en tubería.	37
Tabla 8. Valores de las pérdidas totales en el sifón.	38
Tabla 9. Valor de las pérdidas totales en el sifón.	47
Tabla 10. Determinación de factor de corrección Fc para el cálculo de caudales por el método del flotador	52
Tabla 11. Extremo izquierdo del canal - método correntómetro.	53
Tabla 12. Extremo derecho del canal - método correntómetro.	53
Tabla 13. Centro del canal - método correntómetro.	54
Tabla 14. Cálculos del caudal realizados con el método correntómetro.	54
Tabla 15. Canal La Bruja - método correntómetro.	55
Tabla 16. Cálculos del caudal - método correntómetro.	55
Tabla 17. Extremo izquierdo del canal - método correntómetro.	56
Tabla 18. Extremo derecho del canal - método correntómetro.	56
Tabla 19. Centro del canal - método correntómetro.	57
Tabla 20. Cálculos del caudal realizados con el método correntómetro.	57
Tabla 21. Cálculos del caudal en la entrada del sifón - método flotador.	58
Tabla 22. Cálculos del caudal en la salida del sifón - método flotador.	58
Tabla 23. Experimentación vs simulación.	62
Tabla 24. Comparación entre los modelos RANS y LES.	75
Tabla 25. Regímenes del flujo en canales abiertos.	83
Tabla 26. Regímenes del flujo en tuberías.	83

Tabla 27. Leyes físicas de transporte.	88
Tabla 28. Criterios de calidad del mallado.	93
Tabla 29. Parámetros de calidad de la malla.	107
Tabla 30. Parámetro de configuración del dominio.	117
Tabla 31. Parámetros colocados para el control del solucionador.	120
Tabla 32. Valores de la frontera <i>inlet</i>	129
Tabla 33. Valores de la frontera <i>outlet</i>	131
Tabla 34. Valores de la frontera <i>opening 1</i>	132
Tabla 35. Valores de la frontera <i>opening 2</i>	133
Tabla 36. Valores de la frontera <i>wall</i>	134
Tabla 37. Resumen de los resultados de presión calculados por método analítico y el método numérico.	153
Tabla 38. Resumen de los resultados calculados por método analítico y el método numérico para un $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$	154
Tabla 39. Resumen de los resultados calculados por método experimental para un $Q = 44.097 \text{ m}^3/\text{s}$	155
Tabla 40. Resumen de los resultados calculados por método experimental y el método numérico con $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q = 44.097 \text{ m}^3/\text{s}$	156
Tabla 41. Resumen de los resultados en la variación de la energía.	157
Tabla 42. Comparación de principio de continuidad.	157

Lista de figuras

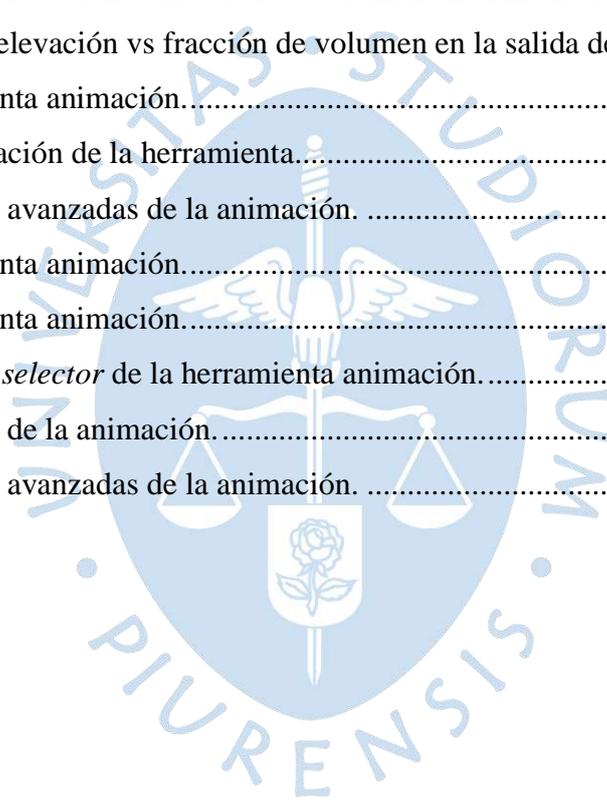
Figura 1. Tipos de sifones.	4
Figura 2. Sifón con ramas oblicuas.	5
Figura 3. Sifón con pozo vertical.	5
Figura 4. Sifón con pozo vertical	5
Figura 5. Sifón con ramas verticales.	6
Figura 6. Sifón con cámara de limpieza.	6
Figura 7. Parte del sifón invertido.	8
Figura 8. Interpretación de la ecuación de la energía en el sifón invertido.	10
Figura 9. Elemento de un fluido utilizado en la ecuación de Bernoulli.	11
Figura 10. Interpretación de la altura requerida para ahogamiento.	15
Figura 11. Sistema hidráulico Chira Piura.	20
Figura 12. Esquema del sistema Medio y Bajo Piura.	21
Figura 13. Ubicación del sifón Piura.	23
Figura 14. Entrada del sifón Piura.	24
Figura 15. Perfil de planta de una transición en un canal.	33
Figura 16. Esquema ilustrativo de la transición de entrada y salida del sifón para el cálculo de “P”.	33
Figura 17. Ubicación del punto A y el tramo 2-3 del sifón.	41
Figura 18. Correntómetro y accesorios.	45
Figura 19. Esquema ilustrativo del aforo con flotador.	50
Figura 20. Aforo en el canal La Bruja.	55
Figura 21. Aforo en puente Aqualandia.	57
Figura 22. Aforo en la entrada del sifón.	59
Figura 23. Aforo en la salida del sifón.	59
Figura 24. Esquema de modelos hidráulicos unidimensional, bidimensional	67
Figura 25. Representación del flujo laminar y turbulento.	72

Figura 26. Ejemplo de una malla estructurada.....	86
Figura 27. Ejemplo de una malla no estructurada.....	86
Figura 28. Ejemplo de una malla híbrida.....	87
Figura 29. Módulo de Ansys CFX.....	91
Figura 30. Esquema de nuestro proyecto en Ansys <i>workbench</i>	92
Figura 31. Procesos en Ansys CFX.....	96
Figura 32. Esquema final de nuestro proyecto en Ansys <i>workbench</i>	97
Figura 33. Interfaz <i>workbench</i> de nuestro proyecto.....	98
Figura 34. Opciones de la celda geometría.....	99
Figura 35. Árbol de operaciones.....	99
Figura 36. Vista del espacio de trabajo <i>design modeler</i>	99
Figura 37. Vista del sifón diseñado.....	100
Figura 38. Opciones de la celda <i>mesh</i>	100
Figura 39. Área de trabajo <i>meshing</i>	101
Figura 40. <i>Mesh control</i>	101
Figura 41. Opciones de mesh control.....	102
Figura 42. Diferentes tipos de métodos de malla que.....	102
Figura 43. Generate mesh.....	102
Figura 44. Herramienta <i>sizing</i>	103
Figura 45. Herramienta <i>refinement</i>	104
Figura 46. Mallado con dimensión 0.4 m.....	104
Figura 47. Opción <i>quality</i> que permite visualizar.....	105
Figura 48. <i>Orthogonal quality</i> de la malla 0.4.....	105
Figura 49. <i>Element quality</i> de la malla 0.4.....	106
Figura 50. <i>Skewness</i> de la malla 0.4.....	106
Figura 51. <i>Aspect ratio</i> de la malla 0.4.....	106
Figura 52. Dimensión de malla 0.2.....	108
Figura 53. Dimensión de malla 0.3.....	108
Figura 54. Dimensión de malla 0.4.....	108
Figura 55. Dimensión de malla 0.5.....	109
Figura 56. Curvas de velocidad en diferentes secciones de canal.....	110
Figura 57. Elementos y nodos del mallado.....	111
Figura 58 <i>Create named selection</i>	113
Figura 59. Asignar nombre a sección.....	113

Figura 60. Nombre de las secciones.....	113
Figura 61. Secciones de frontera.....	114
Figura 62. Opciones de la celda <i>Setup</i>	115
Figura 63. Área de trabajo en <i>Setup</i>	115
Figura 64. Configuración del dominio.....	116
Figura 65. Propiedades del fluido.....	116
Figura 66. Modelo del fluido.....	116
Figura 67. Interacción entre fluidos.....	117
Figura 68. Configuración de las condiciones.....	117
Figura 69. Configuración del tipo de análisis.....	118
Figura 70. Tipo de análisis estacionario.....	118
Figura 71. <i>Solver control</i>	119
Figura 72. Configuración del <i>solver control</i>	119
Figura 73. Opciones avanzadas del <i>solver control</i>	120
Figura 74. Opciones de <i>output control</i>	120
Figura 75. Configuración de <i>results</i> de la herramienta <i>output control</i>	121
Figura 76. Configuración de <i>monitor</i> , opción que.....	121
Figura 77. Cumplimiento del <i>setup</i>	121
Figura 78. Configuración del tipo de análisis.....	123
Figura 79. Tipo de análisis transitorio.....	123
Figura 80. Configuración del análisis transitorio.....	123
Figura 81. Configuración del <i>default domain</i> las.....	124
Figura 82. <i>Solver control</i>	124
Figura 83. Configuración del <i>solver control</i>	125
Figura 84. Opciones avanzadas del <i>solver Control</i>	125
Figura 85. Configuración de <i>output control</i> para.....	126
Figura 86. Datos almacenados en la etapa de procesamiento.....	126
Figura 87. Cumplimiento del <i>Setup</i>	127
Figura 88. Creación de una frontera o zona de interés.....	127
Figura 89. Determinación del nombre.....	128
Figura 90. <i>Basic settings</i> de la frontera <i>inlet</i>	128
Figura 91. Detalles de la frontera <i>inlet</i>	128
Figura 92. Opción <i>fluid values</i> de la frontera <i>inlet</i>	129
Figura 93. <i>Basic settings</i> de la frontera <i>outlet</i>	129

Figura 94. Detalles de la frontera <i>outlet</i>	130
Figura 95. <i>Fluid values</i> de la frontera <i>outlet</i>	130
Figura 96. <i>Basic settings</i> de la frontera <i>opening 1</i>	131
Figura 97. Detalles de la frontera <i>opening 1</i>	131
Figura 98. <i>Fluid values</i> de la frontera <i>opening 1</i>	132
Figura 99. <i>Basic settings</i> de la frontera <i>opening 2</i>	132
Figura 100. Detalles de la frontera <i>opening 2</i>	133
Figura 101. <i>Fluid values</i> de la frontera <i>opening 2</i>	133
Figura 102. <i>Basic settings</i> de la frontera <i>wall</i>	134
Figura 103. Detalles de la frontera <i>wall</i>	134
Figura 104. Opciones de la celda <i>solution</i>	135
Figura 105. Vista preliminar <i>solution</i>	135
Figura 106. Gráfico de los residuos promedios de los volúmenes de control RMS de las ecuaciones.....	136
Figura 107. Gráfico de los residuos promedios de los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de turbulencia.....	137
Figura 108. Gráfico de las variables que han sido seleccionadas para su estudio.....	137
Figura 109. Gráfico de imbalances de las ecuaciones que rigen el comportamiento del fluido.....	138
Figura 110. Insertar nuevo monitor para nuevo análisis de residuos.....	138
Figura 111. Definir nuevo monitor como <i>imbalance</i>	139
Figura 112. Configuración del nuevo monitor <i>imbalance</i>	139
Figura 113. Definir nuevo monitor como masa de agua.....	140
Figura 114. Configuración del nuevo monitor masa de agua.....	140
Figura 115. Gráfico que mide la cantidad de caudal que ingresa y sale de la estructura.....	140
Figura 116. Características y propiedades del fluido mostradas en la finalización de la simulación.....	141
Figura 117. Opciones de la celda <i>results</i>	141
Figura 118. Visualización de la celda <i>results</i> , donde se puede analizar las variables.....	142
Figura 119. Distribución de velocidades en el sifón para un $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$	143
Figura 120. Perfil de elevación vs velocidad del flujo en la entrada del sifón.....	143
Figura 121. Perfil de elevación vs velocidad del flujo en el interior del sifón.....	143
Figura 122. Perfil de elevación vs velocidad del flujo en la salida del sifón.....	144
Figura 123. Distribución de velocidades con valor de 1.5 m/s.....	144

Figura 124. Distribución de presiones en el sifón para un $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$	145
Figura 125. Distribución de presiones a la salida del sifón.....	145
Figura 126. Perfil de elevación vs presión en la entrada del sifón.....	146
Figura 127. Perfil de elevación vs presión en el interior del sifón.....	146
Figura 128. Perfil de elevación vs presión en la salida del sifón.	146
Figura 129. Líneas de corriente a la entrada del sifón.	147
Figura 130. Perfil de fracción de volumen para un $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$ aguas arribas del sifón.	148
Figura 131. Perfil de elevación vs fracción de volumen en la entrada del sifón.....	148
Figura 132. Perfil de elevación vs fracción de volumen en el interior del sifón.....	148
Figura 133. Perfil de elevación vs fracción de volumen en la salida del sifón.	149
Figura 134. Herramienta animación.....	149
Figura 135. Configuración de la herramienta.....	149
Figura 136. Opciones avanzadas de la animación.	150
Figura 137. Herramienta animación.....	150
Figura 138. Herramienta animación.....	151
Figura 139. <i>Timestep selector</i> de la herramienta animación.....	151
Figura 140. Opciones de la animación.....	151
Figura 141. Opciones avanzadas de la animación.	151



Introducción

El campo de la Ingeniería Hidráulica es bastante amplio y complejo, sobre todo conocer el movimiento de un fluido es impredecible. Por este motivo, esta investigación tiene el objetivo de describir el comportamiento del flujo del fluido que atraviesa el sifón Piura empleando la modelación numérica. El estudio de la modelación ya ha venido existiendo en las últimas décadas y actualmente gracias a la aparición de nuevas tecnologías, facilita el estudio de temas relacionados con ingeniería y la hidráulica, resaltando las consideraciones para futuras aplicaciones prácticas en toda clase de estructuras y lograr así, un correcto diseño, conducción de flujos estables, mantenimiento de la estructura y aprovechamiento de recursos hídricos. Sin embargo, esta investigación no solo pretende estudiar el movimiento del agua a través de la modelación, sino también conocer todos los aspectos que influyen sobre la situación actual del sifón Piura y así buscar la forma adecuada de enfrentar el problema desde distintos puntos de vista de las disciplinas tales como: contexto histórico, científico, de entorno físico y social. De esta manera, comprenderemos cual es la función que realiza el sifón y las ventajas que puede otorgar al sistema de abastecimiento de agua potable a la población de los valles del Chira y Bajo Piura.

En la actualidad, el complemento de un modelo numérico se encuentra en los modelos físicos, los cuales también son usados para estudiar el comportamiento de un flujo, creando mejores diseños e incluso optimizando la estructura; sin embargo, la estructura hidráulica en estudio es una estructura real en operación, es por eso que podemos recurrir al método experimental, el cual es un estudio en campo con aforos de apoyo sobre dicha estructura para obtener resultados que luego podrán ser comparados con los resultados del método numérico y obtener una mayor precisión en los cálculos.

Es por ello, que la metodología empleada en esta investigación, tiene el objetivo de comparar los resultados de un método analítico, método experimental y método numérico, aplicados para la misma estructura, inicialmente haciendo una verificación en el diseño del sifón Piura, comprobando así, que cumple con los requisitos hidráulicos necesarios. Finalmente

se realiza la verificación de datos obtenidos y se determina que el modelo numérico es una herramienta confiable y viable para diseños hidráulicos.



Capítulo 1

Los sifones

1.1. Definición

Muchas veces la trayectoria de un canal es modificada por diferentes factores que son un obstáculo para el recorrido del agua tales como un río, otro canal, una carretera o una depresión del terreno. Ante ello se plantea la necesidad de usar estructuras que permitan al agua seguir con su camino a través de ella; aquí nace la idea de las llamadas “obras de arte” en hidráulica que nos ayuden a lidiar con estas situaciones de continuidad. Entre estas obras de arte tenemos al acueducto y el sifón. La función del acueducto es un puente en el cual sólo va a pasar el canal. Mientras que, el sifón es una estructura que va a permitir el paso del flujo por debajo del cauce del río, mejorando la continuidad del agua en su recorrido.

El sifón es una estructura hidráulica cuya sección se apoya directamente en las laderas de la depresión, siguen el perfil que tiene el terreno y aprovecha de manera óptima la carga por gravedad para el movimiento del fluido.

1.2. Tipos de sifones y su funcionamiento

Según Hernández Partida, podemos diferenciar en la Figura 1 los dos tipos de sifones de acuerdo a su funcionamiento: sifón normal y sifón invertido.

1.2.1. Sifón normal

Si hablamos del funcionamiento del sifón normal, su trabajo se debe a la presión atmosférica que hay sobre la superficie del agua a la entrada, será necesario siempre crear un vacío en el interior del conducto para dar inicio a su funcionamiento, así la diferencia de presiones a la entrada o presión atmosférica y en el interior o presión cero, harán que el agua fluya en el sentido ascendente hasta llegar a la cresta del conducto, seguido de esto el agua cae

por gravedad hacia la rama derecha o final dejando un vacío nuevamente en la cresta haciendo que el fluido sea continuo y el proceso se repita. Una observación a tener en cuenta es que no deberá ingresar aire mientras el ciclo de funcionamiento se repite en el interior del conducto, razón además de que la entrada al sifón debe estar ahogada.

1.2.2. Sifón invertido

El sifón invertido viene a ser lo contrario del sifón normal. Conduce el agua por debajo del obstáculo y al ser de fácil funcionamiento es el más usado en canales. Su función está dada por acción de la gravedad, el agua fluirá por el conducto por dicha acción, además acompaña el principio de los vasos comunicantes donde el agua trata de alcanzar el mismo nivel de las dos ramas. No es necesario que el sifón produzca el vacío dentro del conducto.

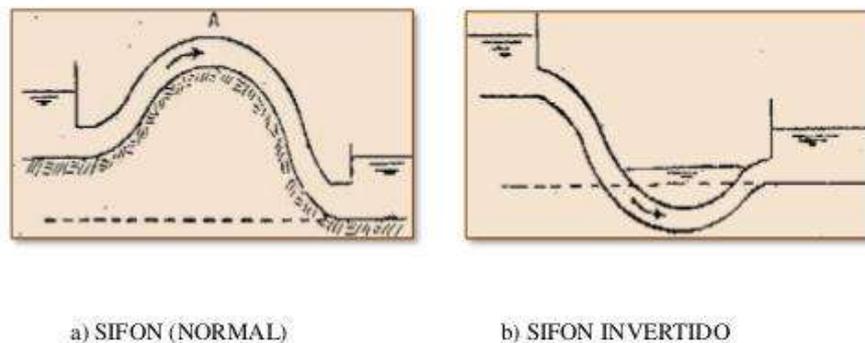


Figura 1. Tipos de sifones.
Fuente: Hernández Partida.

1.3. Ventajas y desventajas

- **Ventajas del sifón:**

- Brinda la solución más conveniente para atravesar una depresión y mantener el funcionamiento hidráulico correcto.
- Permite una economía factible en su construcción, mantenimiento y operación.
- Posee una estructura voluble que puede adaptarse a todo tipo de situaciones.

- **Desventajas del sifón:**

- Requiere de un buen sostenimiento de la tubería de presión sobre el suelo donde es su recorrido.
- Plantea la posibilidad de almacenamiento de sedimentos dentro del conducto, por lo cual se debe prever una válvula de purga o un mantenimiento periódico.

1.4. Tipos de sifones invertidos

Según Palomino (2017), señala en su investigación que los sifones invertidos son estructuras cerradas que trabajan siempre a presión, usados para permitir la continuidad del agua en un canal. Los principales tipos de sifones son los que se indican a continuación:

- A) **Ramas oblicuas:** este tipo de sifón es usado en terreno que no presenta grandes dificultades de ejecución. (Figura 2).

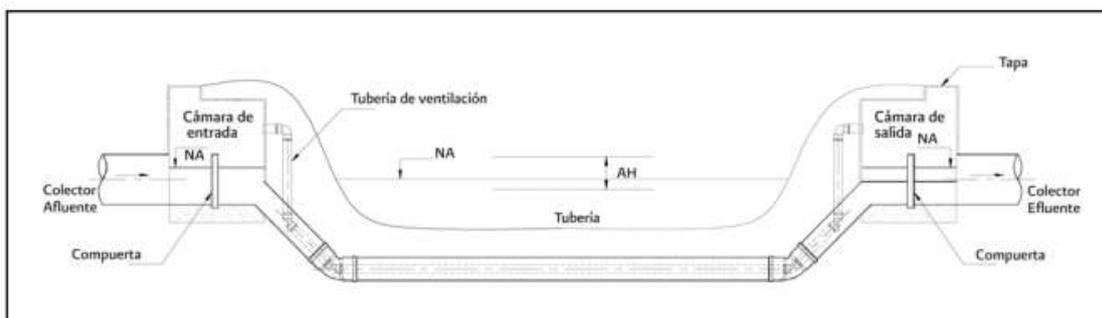


Figura 2. Sifón con ramas oblicuas.
Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2009.

- B) **Pozo vertical:** es utilizado en sifones pequeños, con grandes dificultades constructivas. Sus características de fácil limpieza y reducido espacio, lo hacen muy recomendable. Como observamos en ambos casos puede colocarse el pozo vertical en cualquier de los extremos del sifón. (Figura 3 y 4).

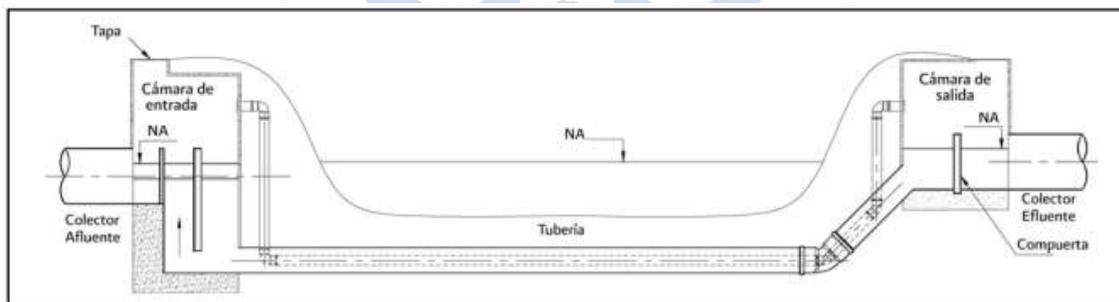


Figura 3. Sifón con pozo vertical.
Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2009.

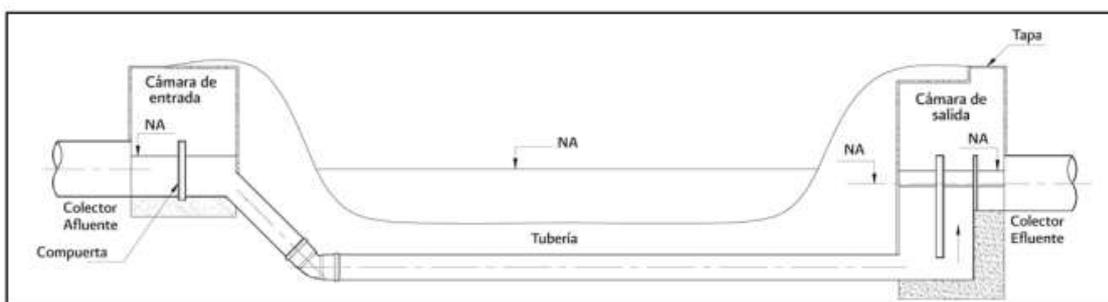


Figura 4. Sifón con pozo vertical
Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2009.

C) **Ramas verticales:** es utilizado en sifones pequeños, con grandes dificultades constructivas. Sus características de fácil limpieza y reducido espacio, lo hacen muy recomendable. (Figura 5).

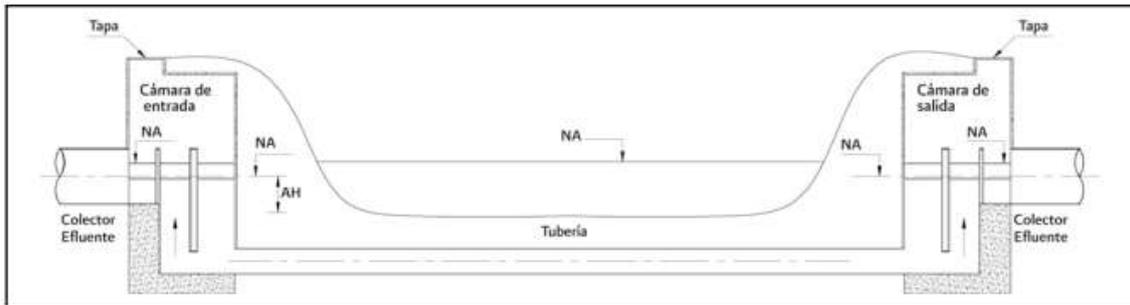


Figura 5. Sifón con ramas verticales.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2009.

D) **Con cámara de limpieza:** es utilizado en obras donde el cruce se realiza por vía subterránea. (Figura 6).

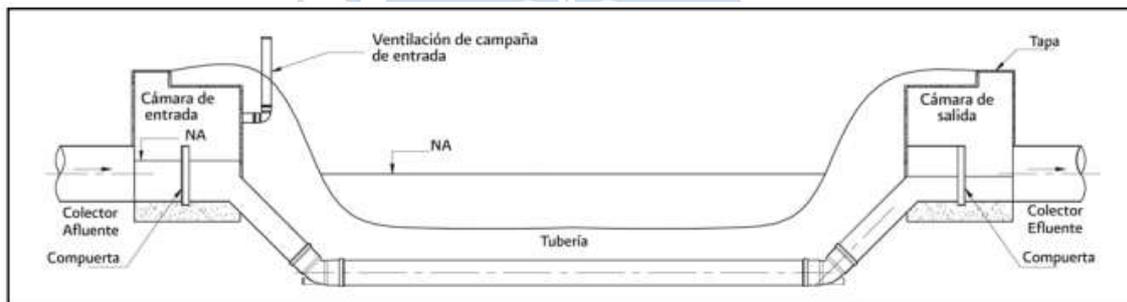


Figura 6. Sifón con cámara de limpieza.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2009.

1.5. Criterios de diseño

La Autoridad Nacional del Agua (2010), señala que los criterios para el diseño de un sifón son los siguientes:

- Las secciones más comunes son la circular y la rectangular. La forma y el número de los conductos se determinan por las condiciones locales y de economía.
- Las dimensiones del tubo se determinan satisfaciendo los requerimientos de cobertura, pendiente del tubo, ángulos de doblados y sumergencia de la entrada y salida.
- En aquellos sifones que cruzan caminos principales o debajo de drenes, se requiere un mínimo de 0.90 m. de cobertura y cuando cruzan caminos parcelarios o canales de riego sin

revestir, es suficiente 0.6 m. Si el sifón cruza un canal revestido se considera suficiente 0.30 m. de cobertura.

- La pendiente de los tubos doblados, no debe ser mayor a 2:1 y la pendiente mínima del tubo horizontal debe ser 5 o/oo. Se recomienda transición de concreto a la entrada y salida cuando el sifón cruce caminos principales en sifones con diámetro mayor o igual a 36" y para velocidades en el tubo mayores a 1 m/s.
- Con la finalidad de evitar desbordes aguas arriba del sifón debido a la ocurrencia fortuita de caudales mayores al del diseño, se recomienda aumentar en un 50 % ó 0.30 m como máximo al borde libre del canal en una longitud mínima de 15 m a partir de la estructura.
- Con la finalidad de determinar el diámetro del tubo en sifones relativamente cortos con transiciones de tierra, tanto a la entrada como a la salida, se puede usar una velocidad de 1 m/s. En sifones con transiciones de concreto igualmente cortos se puede usar 1.5 m/s y entre 3 m/s a 2.5 m/s en sifones largos con transiciones de concreto con o sin control en la entrada.
- En el caso que el agua acarree arenas u otros materiales abrasivos es conveniente limitar la velocidad a un máximo de 3 m/s, y con el objeto de no tener obstrucciones y dificultades durante la operación, la velocidad mínima del agua debe ser de 1.5 m/seg.
- Las pérdidas de carga por entrada y salida para las transiciones tipo "Cubierta Partida", se pueden calcular rápidamente con los valores 0.4 hv y 0.65 hv respectivamente, o con las fórmulas de pérdidas por fricción de tuberías.
- A fin de evitar remansos aguas arriba, las pérdidas totales computadas se incrementan en 10%.
- En el diseño de la transición de entrada se recomienda que la parte superior de la abertura del sifón, esté ligeramente debajo de la superficie normal del agua. Esta profundidad de sumergencia es conocida como sello de agua y en el diseño se toma 1.5 veces la carga de velocidad del sifón ó 1.1 como mínimo o también 3.
- En la salida, la sumergencia no debe exceder el valor $H_{te}/6$.
- En sifones relativamente largos, se proyectan estructuras de alivio para permitir un drenaje del tubo y para su inspección y mantenimiento.
- En sifones largos, bajo ciertas condiciones, la entrada puede no sellarse ya sea que el sifón opere a flujo parcial o a flujo lleno, con un coeficiente de fricción menor que el asumido en

el diseño, por esta razón se recomienda usar $n = 0.008$ cuando se calculan las pérdidas de energía.

- Con la finalidad de evitar la cavitación, a veces se ubica ventanas de aireación en lugares donde el aire podría acumularse. Debemos tener en cuenta que se recomienda no exceder los 15 m/s para no correr riesgos de cavitación.
- Con respecto a las pérdidas de cargas totales, se recomienda la condición de que éstas sean iguales o menores a 0.30 m.
- Cuando el sifón cruza debajo de una quebrada, es necesario conocer el gasto máximo de la avenida. Deberá efectuarse un cálculo de la erosión potencial.
- Se recomienda que el tramo descendente del conducto tenga una pendiente de 1:1 a 1:3 y de 1:2.5 hasta 1:7 para el tramo ascendente, como también una pendiente de 1:100 a 1:1000 no menor a 0,5 % en el tramo inferior.

1.6. Partes del sifón invertido

La Autoridad Nacional del Agua (2010), indica en su manual las partes del sifón invertido y además que algunas de las partes que se muestran en la Figura 7, no siempre se verán involucradas en el diseño de esta estructura, ello dependerá del uso que vaya a darse al sifón.

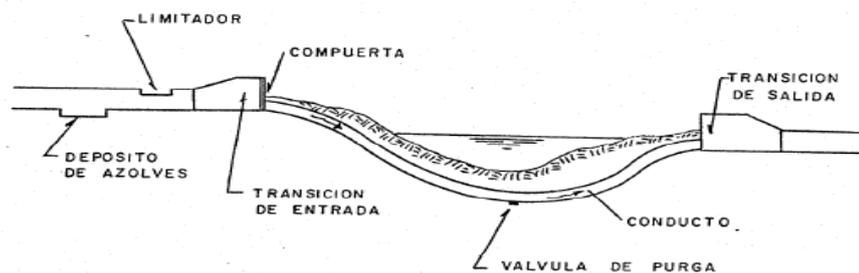


Figura 7. Parte del sifón invertido.
Fuente: Hernández Partida.

- Depósito de azolves.** - Es construido con el objetivo de retener el material sólido que pueda arrastrar el agua al ingresar al sifón y reduciendo la velocidad y la turbulencia.
- Compuerta.** - Son usadas en caso de emergencia o cuando necesite hacer mantenimiento al sifón, esta permite cerrar el sifón. Construidas a la entrada del conducto o al final de la

transición de entrada. Pueden también tener como función retener objetos extraños que impidan el funcionamiento adecuado del conducto.

- C. **Transición de entrada y salida.** - Esta estructura ayuda a en la conexión entre el canal y el sifón, ya que pasa gradualmente de una sección a otra con normalidad sin provocar pérdidas de energía o turbulencias. En el diseño de las transiciones se recomienda que la abertura de la parte superior del sifón se encuentre por debajo de la superficie del agua, manteniendo la capacidad que ingreso al sifón causada.
- D. **Válvula de purga.** - ubicada en la parte más baja del sifón, permitiendo hacer un mejor mantenimiento y expulsión de aguas residuales dentro del conducto. Estas válvulas deben abrirse ocasionalmente cuando haya un aumento de velocidad en el flujo.
- E. **Conducto.** - Estructura más importante y necesario del sifón ya que se encarga de transportar el agua de un punto a otro sometido a presión. Se debe tener en cuenta algunos requisitos que podrían evitar posibles fracturas en el sifón y que se vuelva más costoso de operar. Una manera de lograr que el mantenimiento de esta estructura no sea elevado, será necesario colocar soportes y anclajes de la tubería en pendientes estables y así no se desplace por efectos de la erosión y también se encuentre fijo en cada cambio de dirección. En caso en que el sifón fuera construido sobre lechos o curso de agua, se debe verificar su peso y anclar la tubería con el fin de que no se produzca una flotación de la estructura durante el proceso de construcción.

1.7. Hidráulica del sifón invertido

Gracias a la forma que presenta el sifón invertido, el recorrido de las líneas de corriente entre los puntos extremos de la estructura, donde la entrada es mayor a la salida, se produce escurrimiento por gravedad y presión hidráulica. La carga hidráulica disponible será posible calcularla gracias al principio de la conservación de la energía, la cual nos indica que para cumplirse debe existir una condición, diferencia de alturas entre un punto y el otro, como se ve en la Figura 8.

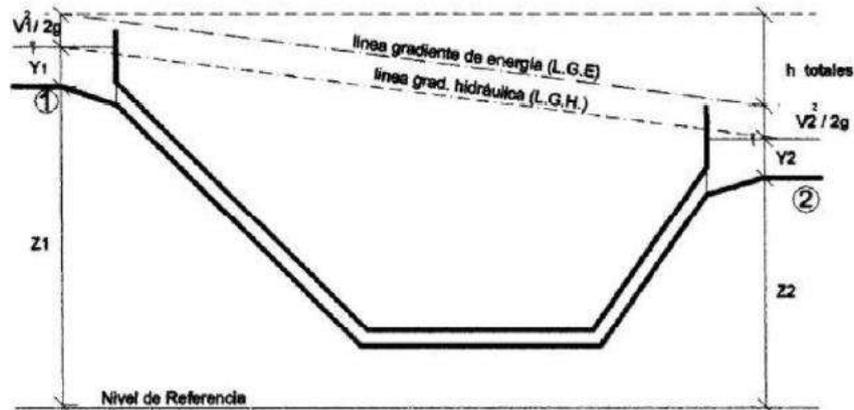


Figura 8. Interpretación de la ecuación de la energía en el sifón invertido.
Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2010.

$$\Delta H = E_1 - E_2 \quad \text{Ecuación 1-1}$$

$$\Delta H = \frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad \text{Ecuación 1-2}$$

La Autoridad Nacional del Agua (2010), indica que se debe cumplir que la ΔH debe ser mayor a la suma de todas las pérdidas que se generen en el sifón, esto lo que significa que no habrá problema hidráulico.

Según Mott & Untener (2015), existen tres formas de energía que siempre se consideran en el análisis de un problema de flujo en tuberías, miden las cargas hidráulicas entre dos puntos de sifón. La Ecuación de Bernoulli, aplicado a la resolución de sifones y a la salida de líquidos que atraviesan una tubería, al mismo tiempo que también se utiliza para calcular la pérdida de cargas en canales abiertos; presenta un concepto considerando un elemento en un fluido, éste se encuentra a cierta elevación “z”, tiene velocidad “v” y presión “p”, como se aprecia en la Figura 9 y se desarrolla de la siguiente manera:

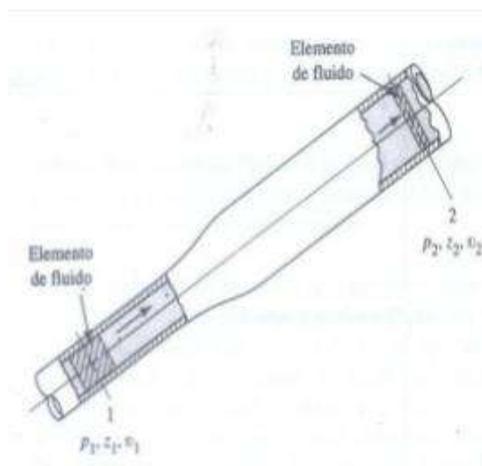


Figura 9. Elemento de un fluido utilizado en la ecuación de Bernoulli.
Fuente: (Mott & Untener, 2015).

- Energía potencial: debido a su elevación, la energía potencial del elemento, en relación con algún nivel de referencia es:

$$PE = wz \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Donde “w” es el peso del elemento.

- Energía cinética: debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es:

$$KE = \frac{wv^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1-4}$$

- Energía de flujo: en ocasiones llamada energía de presión o flujo de trabajo, representa la cantidad de trabajo necesaria para mover el elemento del fluido a través de una sección determinada contra la presión “p”. La energía de flujo se abrevia FE y se calcula a partir de:

$$KE = \frac{wp}{\gamma} \quad \text{Ecuación 1-5}$$

- La fuerza ejercida sobre el elemento es “pA”, donde “p” es la presión en la sección y “A” es el área de la sección. Al desplazar el elemento a lo largo de la sección, la fuerza se desplaza una distancia “L” igual a la longitud del elemento. Por lo tanto, el trabajo realizado es:”.

$$\text{Trabajo} = pAL = pV \quad \text{Ecuación 1-6}$$

Donde "V" es el volumen del elemento. El peso del elemento "w" es:

$$w = \gamma V \quad \text{Ecuación 1-7}$$

Donde " γ " representa el peso específico del fluido. Entonces, el volumen del elemento es:

$$V = w/\gamma \quad \text{Ecuación 1-8}$$

$$\text{Trabajo} = pV = pw/\gamma \quad \text{Ecuación 1-9}$$

- La cantidad total de energía de estas tres formas poseídas por el elemento del fluido es:

$$E = FE + PE + KE \quad \text{Ecuación 1-10}$$

$$E = \frac{wp}{\gamma} + wz + \frac{wv^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1-11}$$

- Considerando ahora el elemento del fluido, el cual va de la sección 1 a la sección 2. Los valores de "p", "z" y "v" son diferentes en las dos secciones.

$$E1 = \frac{wp_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wv_1^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1-12}$$

$$E2 = \frac{wp_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wv_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1-13}$$

- Si no se añade energía al fluido ni se pierde energía entre las secciones 1 y 2, entonces el principio de conservación de la energía exige que:

$$\Delta H = E1 = E2 \quad \text{Ecuación 1-14}$$

$$\frac{wp_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wv_1^2}{2g} = \frac{wp_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wv_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1-15}$$

- El peso del elemento “w” es común a todos los términos y se puede realizar su división. Así, la ecuación se convierte en:

• **Ecuación de Bernoulli:**

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1-16}$$

1.8. Tuberías de presión

1.8.1. Velocidades en el conducto

Según Palomino (2017), existen criterios a evaluar cuando se quiere determinar la velocidad que tendrá el agua en el sifón. Los rangos estimados de velocidad del flujo estarán comprendidos entre 1 m/s a 3 m/s aproximadamente, esto dependerá de las dimensiones que tenga el sifón de estudio.

Ya que donde existan sifones de distancia corta las velocidades recomendadas serán de 1 m/s a 1.5 m/s. y donde existan sifones de distancias largas las velocidades serán de 3 m/s.

1.8.2. Material del conducto

Según Palomino (2017), los materiales que podrían utilizarse en el diseño del sifón serían tubos de hierro fundido dúctil, concreto, plástico o acero, pero es más común sería el hierro fundido dúctil debido a su fácil instalación, esto dependerá de las secciones típicas que tenga la estructura hidráulica o también del terreno que atraviesa, como es el caso en el cual si el sifón es construido sobre algún paso de agua, debemos estudiar y calcular el peso de las tuberías para evitar la flotación y desplazamiento del mismo.

Se puede hacer uso de tuberías de concreto reforzado como concreto precolado que son los más comunes para sifones de secciones circulares que usan cargas de hasta 50 metros. Para la misma sección circular de sifón, si la carga es mayor a 50 metros se usarían tuberías de placa

de acero, tubos de concreto precolado con cilindros de acero, tuberías de acero fundido y tubos de concreto preesforzado.

Algo que debemos tener muy cuenta, es la presencia de los esfuerzos reducidos del acero, los cuales nos permitirán tener mayor garantía de impermeabilidad de la tubería de concreto, evitando además la formación de grietas o fugas de agua.

1.8.3. Especificaciones para la cobertura del conducto

Según Palomino (2017), un sifón invertido que está por debajo del nivel de terreno natural; estará sometido a excesivas cargas. Para evitar que estas cargas dañen la estructura del sifón, es recomendable que exista cierta distancia entre la corona de la tubería y la superficie del terreno, es por ello que se coloca una capa de determinada profundidad con el fin de evitar complicaciones sobre el sifón. Estos datos han sido recopilados de la experiencia laboral trabajados en campo. Por ejemplo:

- Debe existir una capa de 1 m a profundidad como mínimo en las laderas y de 1.5m en los cruces del cauce.
- Debe existir una capa de 0.60 m en canales de tierra y 0.15 m en canales revestidos.
- Debe existir una capa de 0.90 m como mínimo en cruces de vías férreas.
- Debe existir una capa de 0.90 m sobre el cruce de carreteras y de haber cunetas en la carretera que se extienden sobre el tubo, el espesor de la capa deberá ser de 0.60 m.

1.9. Elección del diámetro de la tubería

En este punto es muy importante conocer el comportamiento del fluido antes de entrar al conducto del sifón, ya que de ello depende el diámetro que tendrá la tubería y que además un cambio en la dimensión del conducto puede representar un gran cambio en el costo de la estructura si no ha sido analizada de manera correcta, por lo tanto, es recomendable que se disponga de diámetros mínimos que en parte pueden soportar mayores presiones.

Según Hernández Partida, determinaremos el diámetro que debe tener el conducto del sifón por medio de la ecuación de la continuidad, para un gasto determinado la velocidad del fluido tiene un rango permitido recomendable que esta entre 1.5 m/s - 3.5 m/s, para que no se produzca sedimentación o erosión en la tubería.

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

Ecuación 1-17

Donde:

D = diámetro de la tubería.

A = área del conducto.

1.10. Cantidad necesarias de aberturas

Proyectando la necesidad de reparaciones o mantenimientos sobre los elementos del sifón, éste debe contar un mínimo de dos tuberías y debe ser diseñado, evaluando diferentes casos como el primero, que cada una funcione individualmente sin afectar el funcionamiento de la otra y la segunda razón, que, debido a la variación del caudal debe existir más conductos y permitan mantener una velocidad adecuada al sifón.

1.11. Verificación del ahogamiento

La Autoridad Nacional del Agua (2010), explica que el funcionamiento de sifón es debido a la presión en su interior. En un sifón invertido, no es necesario el ahogamiento desde el punto de vista de su funcionamiento hidráulico, sin embargo, es recomendable que trabaje ahogado para evitar que se introduzcan objetos sólidos al interior. El ahogamiento mínimo que debe cumplir es ser un décimo del tirante. También se recomienda cumplir con un rango de $[1.1hv - 1.5 hv]$ para la profundidad de sumergencia, esto lo podemos ver en la Figura 10, donde “ hv ” es la carga de velocidad o representación de la energía cinética.

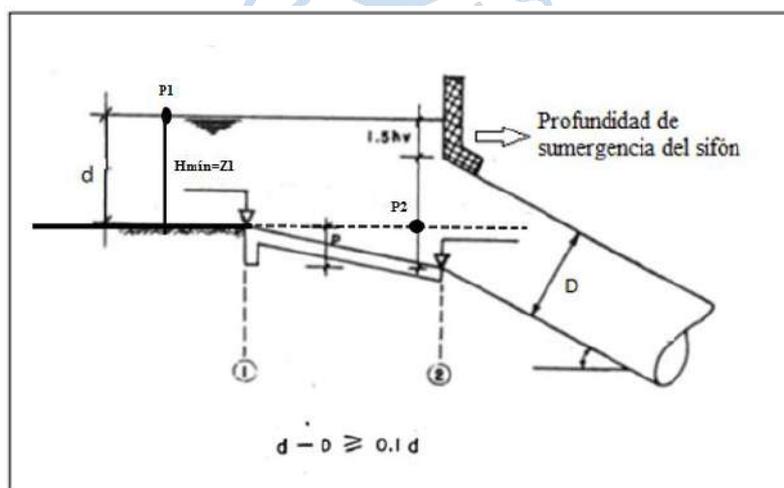


Figura 10. Interpretación de la altura requerida para ahogamiento.
Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2010.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + hf \quad \text{Ecuación 1-18}$$

Donde:

$$hf = 0.5 * \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1-19}$$

Reemplazando hf y Z1:

$$\frac{p_1}{\gamma} + H_{\text{mín}} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + 0.5 * \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1-20}$$

$$H_{\text{mín}} = \frac{3}{2} * \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1-21}$$

También puede ser usada como:

$$H_{\text{mín}} = 0.3 * Vt * \sqrt{D} \quad \text{Ecuación 1-22}$$

Donde:

D = diámetro de la tubería.

Vt = velocidad del conducto.

1.12. Mantenimiento del sifón

Según Herrera (2010), en su investigación indica que el sifón invertido funciona de manera eficiente siempre y cuando este pleno de agua, porque al atascarse no evacuará el agua al exterior. Es por ello, que exige un cuidado especial con la finalidad de evitar obstrucciones en su interior provocado por sólidos pesados como rocas u otros materiales que se resistan al arrastre hidráulico. Lo recomendable es que el sifón se someta a inspecciones regulares una o dos veces al mes, a través de las cuales pueda ser previsto a tiempo el desplazamiento de obstrucciones presentes. La limpieza puede ser efectuada por diversos procedimientos:

- Limpieza manual, utilizando un equipo de limpieza de sifones muy eficiente llamada Bucket-Machine, el cual es controlado por un motor que tira de un cable de acero que se enrolla y desenrolla, jalando así en un extremo un recipiente que se ha introducido en el sifón para recoger sólidos.
- Lavado con agua que ha sido suministrado por un camión de succión-presión.
- Se detiene momentáneamente la trayectoria del agua en el tramo aguas arriba del sifón para luego realizar una apertura instantánea de la compuerta.
- Descarga de fondo en un punto inferior del sifón, siempre y cuando las condiciones lo permitan.





Capítulo 2

El Sifón del río Piura

2.1. Fases del Proyecto Especial Chira Piura

Las principales obras realizadas por el CONSORCIO IECO - SALZGITTER – LAGESA, en su informe preliminar sobre el canal principal de irrigación, señala el esquema del proyecto Chira-Piura, localizados en los valles del Piura y del Chira. Como se puede ver en la figura 11, la ejecución de las obras se ha planificado en tres etapas, de las cuales la primera y la segunda etapa ya están terminadas. Las obras de cada una de esas tres etapas son:

I Etapa

- Reservoirio de Poechos, de una capacidad de 885 MMC.
- Canal de Derivación Daniel Escobar, de 54.4 Km. de longitud y 80 m³/s. de capacidad. Deriva las aguas del río Chira al río Piura.
- Canal Parales.
- Sistema de drenaje del valle del Bajo Piura.
- Diques de la laguna de San Ramón.

II Etapa

- Las obras se iniciaron en enero de 1980 y terminaron en 1989 con la ejecución de los trabajos de reconstrucción de las obras dañadas por el Fenómeno El Niño 1983. Servicios de extensión agrícola y riego tecnificado.
- Presa derivadora de Los Ejidos, con una capacidad de captación de 64 m³/s, con una capacidad de descarga de 3200 m³/s.
- Canal principal del Bajo Piura “Biaggio Arbulú”, de 58 km de longitud y capacidad, en el inicio, de 60 m³/s.
- Diques de defensa y encauzamiento del río Piura en el Bajo Piura, con una longitud total de 63 Km., de los cuales 38 km corresponden al dique derecho y 25 km al dique izquierdo. Construcción de 73.5 km de canales secundarios y terciarios revestidos de concreto.

- Construcción de 63 km de diques de encausamiento del río Piura, desde el puente Bolognesi en la ciudad de Piura hasta la laguna Ramón.

III Etapa

- Presa derivadora Sullana, la cual ya está terminada. Estructura de concreto armado con tomas para el Canal Norte y Canal Capilla Jibito.
- Sistema de Canales Norte y Sur, que aún están en ejecución. El canal Norte tendrá una longitud de 39.20 Km. y una capacidad variable de 25.5 m³/s. A 3.8 m³/s.; el canal Sur con una longitud de 25.75 Km. Y capacidad variable 7.00 m³/s a .55 m³/s. La toma de este canal se ubica en el Km. 16+ 156 del canal Norte.
- Sistema de drenaje, con una longitud de 52.69 Km. Se encuentra en ejecución.
- Sistema de defensas contra inundaciones, con una longitud de 57.02 Km. Este sistema necesita reconstrucción.

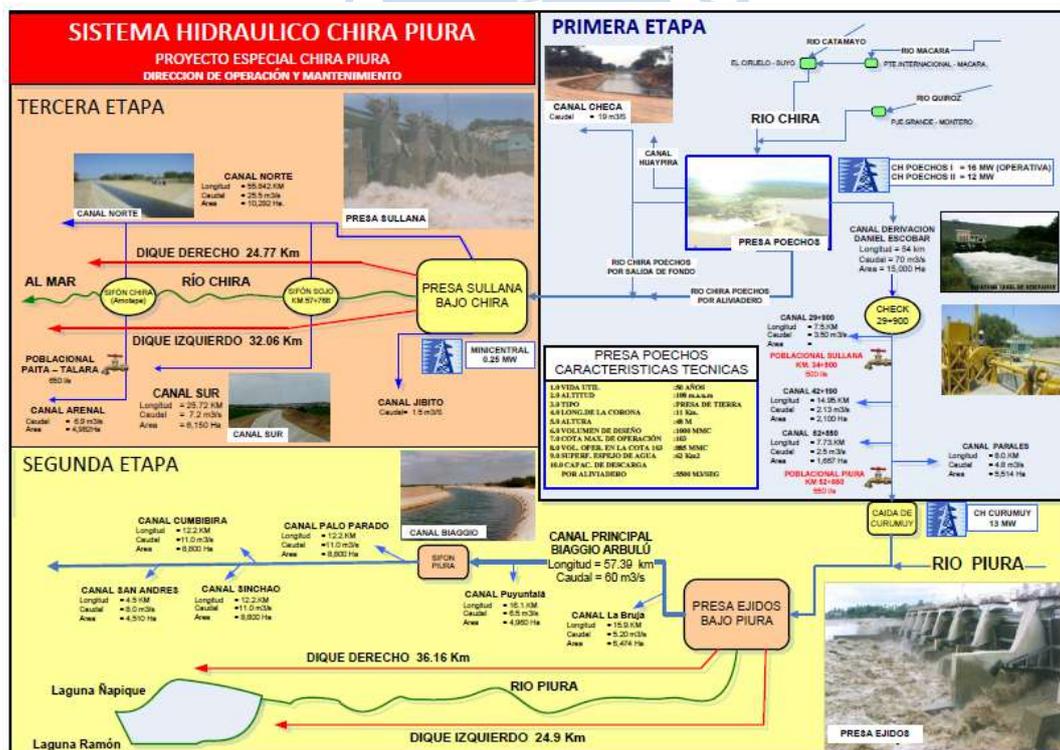


Figura 11. Sistema hidráulico Chira Piura.
Fuente: Proyecto Especial Chira Piura.

2.2. Sistema de Medio y Bajo Piura

Según el CONSORCIO INCLAM (2012), el sistema está vinculado a la presa de Poechos y por ende a la disponibilidad del recurso hídrico en el río Chira, considerando que las aguas que abastecen al sistema Medio y Bajo Piura en el período de estiaje dependen del

Por un lado, tratamos de conseguir una herramienta de prevención como la modelación numérica, que ayuda a presentar un problema de una manera más intuitiva y práctica, mientras que, por otro lado, la interdisciplinariedad, cualidad que debe formarse toda persona en la sociedad, permite el estudio de diversas disciplinas o competencias que intervienen en un problema, consiguiendo comprender todos los aspectos influyentes. Es así, que conseguiremos afrontar una verdadera solución o mejora frente a futuros problemas reales.

Aplicar las competencias de desarrollo en nuestra investigación nos serviría, para empezar, ubicando el sifón y la posible conexión con una estructura mayor o el río Piura, luego en el contexto histórico, detallar la necesidad de uso de esta estructura. En el contexto científico, aparece la pregunta sobre porque resolvemos así el problema; en el contexto físico, conocer la situación actual con el paisaje y finalmente en el contexto social, el entorno social que lo rodea.

2.4. El sifón del río Piura

2.4.1. Antecedentes

Hacia el año de 1982, se construye el sifón Piura, estructura más importante del canal Biaggio Arbulú que cruza el río Piura, y entrega el mayor transporte de agua en toda la región con una capacidad de 45 m³/s.

Durante el fenómeno El Niño en 1997-1998, el río Piura puso en evidencia fuertes erosiones de hasta 3 m con respecto al fondo de su cauce, esto como resultado de las crecidas a través de todas sus secciones. Ocasionó la pérdida del puente Bolognesi y en el tramo del kilómetro donde se encuentra localizado el sifón Piura, la erosión general permanente que surgió, hizo que la parte superior de concreto del sifón perdiera su recubrimiento y quedara expuesta, aflorando el techo del cajón.

Otras obras similares a estas las encontramos en la provincia de Sullana, nos referimos al Sifón Samán de una capacidad de 25.5 m³/s y al Sifón Sojo de 5.90 m³/s, dichas estructuras también se han visto afectadas por avenidas grandes, como es el caso del Sifón Samán que fue declarado en estado de emergencia en el año 2016 cuando una avenida de la quebrada Samán rompió el concreto armado de la estructura subterránea del sifón o el caso del Sifón Sojo que fue ampliado de su longitud inicial de 1212 m a 1515 m por efectos del fenómeno El Niño en 1998.

Los daños ocasionados no solo afectan a la infraestructura hidráulica, es importante tomar en cuenta la función que cumplen al transportar un flujo de agua pues se encargan de dotar cantidades necesarias para las actividades agrícolas del Chira y Piura, así como su uso

poblacional. Las grandes pérdidas de recursos, evidencias claramente la necesidad de contar con predicciones fiables que permitan tomar a tiempo medidas de protección de la población.

2.4.2. Localización y accesos

El sifón Piura forma parte del Proyecto Especial Chira-Piura, ubicado en la progresiva Km 012+396 del canal Biaggio Arbulú, en las coordenadas UTM 9 421 837 Norte y 538987 Este. Con una longitud de 300 m desde su inicio hasta su salida, es una infraestructura que cruza el río Piura, esto se aprecia en la figura 13. En este tramo aguas abajo de la ciudad de Piura se encuentra el puente Grau, uno de los puentes más largos de la región con 304.8 m; y 50 m aguas arriba se encuentra el sifón. El comportamiento del río Piura se ve afectado en el área de influencia del puente Grau.

En la ubicación del sifón, el dique de la orilla izquierda está muy cerca de la orilla del río (a unos 100 m del centro del río del canal de flujo bajo), mientras que el dique de la orilla derecha se encuentra a unos 500 m del centro del río. La figura 14 muestra la entrada al sifón conectada al canal Biaggio Arbulú.



Figura 13. Ubicación del sifón Piura.

Fuente: Google Earth.



Figura 14. Entrada del sifón Piura.
Fuente: Elaboración propia.

2.5. Canal Biaggio Arbulú

2.5.1. Características del canal

A) Sección transversal del canal

El CONSORCIO IECO - SALZGITTER – LAGESA señala que el canal principal se concibió originalmente como un canal revestido con una pendiente de terreno de 0.0002 y una pendiente de talud 1:5:1. Gracias a nuevas investigaciones de campo hay algunas modificaciones por hacerse. Se propone una nueva sección sin límites del canal entre km 0+285 y km 1+400 y ahora se propone una sección de alcantarilla entre km 8+000 y km 8+500. Sin embargo, los siguientes criterios de la Tabla 1 se han adoptado en el diseño:

Tabla 1. Criterios para diseño del canal.

	Sección con revestimiento	Sección sin revestimiento
Pendiente de terreno	0.0002	0.00015
Max diseño de velocidad	1.64 m/s	0.9 m/s
Manning "n"	0.014	0.0225
Pendiente de talud.	1.5:1	2:1
Borde libre	0.6 m	1.5 m

Fuente: CONSORCIO IECO - SALZGITTER - LAGESA, 1981.

El canal está formado por una vía de servicio de 5,5 m de ancho en la orilla derecha y una berma de 3 m de ancho en la orilla izquierda. En las secciones de corte profundo entre el km 0 + 285 y el km 1 + 400, se ha omitido el camino de servicio porque existe un camino de

acceso dentro de los 100 m y también hay un camino de 3 m de ancho. Además, en las secciones de corte profundo, donde la profundidad de corte por encima del nivel del banco supera los 5 m adicionales a 3 m Se proponen bermas a 4,5 m intervalos verticales.

En las secciones donde se propone tener un bajo drenaje al revestimiento del canal, se construirá un lecho de filtro de arena seleccionada y material de grava. Este lecho filtrante será de 0,1 m de espesor en las pendientes laterales y de 0,3 m de espesor en el fondo del canal. Las válvulas de drenaje se instalarán en bolsas de material de filtro en centros de 4 m, ligeramente desviados de la línea central del canal.

B) Condiciones de suelo

Se excavaron una serie de pozos de prueba a lo largo de la ruta de la canal propuesta. Entre los propósitos de este programa, se deseaba mantener el nivel freático e identificar la existencia de suelos potencialmente difíciles como arcillas expansivas; estos datos colaborarían con el diseño del canal en mención.

C) Investigaciones sobre el nivel freático

Se cavaron un total de 34 pozos de prueba para investigar el agua subterránea y también se obtuvieron datos adicionales de los pozos para la investigación de la financiación. La elevación del nivel freático varía considerablemente a lo largo de la ruta del canal y, como regla general, se encontró que cerca de la ruta del canal donde el riego se practica, el nivel freático es alto. La excepción fue el área de Hacienda Miraflores, donde se cree que un nivel freático alto es el resultado de la influencia del canal sin revestimiento de Miraflores cuyo nivel de agua está aproximadamente a 3 m por encima del nivel de agua máximo propuesto en el canal principal.

D) Suelos potencialmente difíciles

Gracias a estudios se conoce que el único tipo de suelo que puede causar daños en el revestimiento del canal, así como los canales secundarios conectados al canal principal y el sifón Piura, en es la arcilla altamente plástica, la cual presenta grandes cargas de volumen cuando se humedece. El área más grande donde se encontró este material es en la Hacienda Miraflores. La solución a este problema y el problema potencialmente difícil del agua subterránea, se decidió diseñar una sección de canal sin revestimiento en esta área. Esto es factible ya que los informes anteriores han señalado que este tipo de arcilla tiene una permeabilidad muy baja, la cual, en todos los propósitos prácticos, puede considerarse impermeable. Las bandas estrechas de este material se identificaron en los pozos de prueba 17

y 33 en las progresivas 6 + 400 y 15 + 000 respectivamente, pero estas bandas no se consideran lo suficientemente significativas para alterar el diseño del canal.

E) Fuentes potenciales de materiales de construcción

El área principal donde se requiere relleno para los terraplenes del canal se encuentra entre El Indio y el sifón a través del río Piura, por lo tanto, los esfuerzos se concentraron en esta área. Se investigaron cuatro sitios y se excavaron un total de 29 pozos de prueba. Las cuatro ubicaciones fueron designadas El Indio, San Bernando, Chiclayito y largo del Canal y se pueden ver delineadas en los planos que muestran la ruta del canal.

Los registros de los pozos de prueba muestran que no hay áreas extensas de lechos gruesos de material homogéneo. Tienden a haber más material arcilloso en las arenas gruesas. Hay depósitos de material arcilloso arenoso que es ideal para la construcción de terraplenes, pero probablemente será necesario mezclar las arenas gruesas con los materiales más plásticos. Las cantidades finales de los movimientos de tierra no se habían calculado todavía, pero las observaciones preliminares indican que hay suficiente material adecuado para la construcción del terraplén a lo largo de la ruta del canal.

F) Tramos del canal principal

Los informes elaborados por CONSORCIO IECO - SALZGITTER – LAGESA nos muestra una breve descripción distancia a distancia del diseño del canal principal que describe las características principales del canal Biaggio Arbulu. Algunos detalles, como los kilómetros, pendientes y requisitos de drenaje, pueden cambiarse cuando mejores datos de campo estén disponibles

- Km 0+000 a km 0+170

Este tramo del canal une la Bocatoma a la primera estructura de control en el canal. Se encuentra principalmente en corte profundo (más de 9 m) y se alineará. Este tramo es el único de este tipo en el Canal Principal. La pendiente del terreno es de 0.0002 y la capacidad hidráulica es de 64 m³/s. El drenaje se requiere en la sección y se logrará, como en otras secciones revestidas por válvulas ubicadas a intervalos de 4 m.

- Km 0+170 a km 0+285

Este tramo está ocupado por una vía de evacuación / limo / canal de medición combinados y un puente de una sola vía. Se planifica de manera que el flujo descendente mínimo requerido de 4m³/s vuelva al río Piura a través del eyector de limo. El vertedero y el

eyector de limo se descargan en un desagüe que fluye hacia el río Piura a través de una estructura cerrada para evitar los flujos de retorno en las etapas del río. También se requiere un dique adicional.

- Km 0+285 a km 1+400

Las perforaciones de prueba en este tramo del canal han indicado una elevación muy alta del nivel freático en algunos lugares por encima del nivel máximo de agua de diseño. Estas perforaciones también indican la presencia de material arcilloso en expansión en el estrato donde se construiría la sección del canal. Como esta arcilla normalmente es impermeable, se propone construir una sección sin recubrimiento en este tramo, evitando así la necesidad de drenaje. Para el diseño de esta sección, se ha asumido una velocidad máxima de 0,9 m/s para una descarga de 60 m³/s y este tramo tendrá una pendiente de 15 m³/s km y 2:1 pendientes laterales se han vaciado rápidamente. Se ha asumido que un borde libre de 1,5 m da un corte máximo de 4,3 m a la primera berma.

- Km 1+400 a km 2+600

Este tramo del canal atraviesa un terreno de aproximadamente 31 m de elevación y está totalmente cortado. El suelo es arenoso y por lo tanto será una sección con recubrimiento. La capacidad será de 60 m³/s y la pendiente será de 0.0002. El riego se practica en ambos lados de este canal y el nivel freático es a menudo muy alto. Por lo tanto, se propone el drenaje mediante válvulas. Este tramo del canal está inmediatamente adyacente y paralelo a la carretera de acceso a la construcción existente para la presa de desvío y esta carretera se utilizará posteriormente como la vía de servicio del canal.

- Km 2+600 a km 5+000

Este tramo del canal pasa a través de bosques y tierras desérticas que no se utilizan, excepto en el punto donde el canal cruza la antigua carretera Panamericana. Los pozos de prueba en este tramo no encontraron el nivel freático, por lo tanto en la actualidad, parece que no hay requisitos para el drenaje. La sección del canal está totalmente cortada en todo este tramo con una capacidad de 60 m³/s y una pendiente de 0.0002.

- Km 5+000 a km 8+000

Desde el km 5 + 000 en adelante, se encontró agua subterránea en los pozos de prueba a lo largo de la ruta del canal, por lo tanto, se requiere drenaje. Las áreas cultivadas existentes

están irrigadas en ambos lados del canal. En el kilómetro 5 + 700 aproximadamente, el nivel máximo de agua del diseño del canal está por encima del nivel del suelo y hay un requisito para la importación de relleno. La capacidad del canal sigue siendo de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ y la pendiente es de 0.0002. Se propone ubicar un puente de carril único en el km 6 + 600 en beneficio del tráfico agrícola.

- Km 8+000 a km 8+500

Este tramo del canal pasa a través de un área abierta entre El Indio y San Bernardo. Para evitar el peligro potencial para la población local, se propone construir una alcantarilla de triple barril que lleve la descarga máxima de diseño de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ en un flujo de canal abierto. La pendiente de diseño es 0.00115. La estructura de hormigón de la alcantarilla se diseñará para ser utilizada como en la calle en el desarrollo urbano propuesto.

- Km 8+500 a km 8+800

Se propone ubicar una estructura de verificación en el km 8 + 800 para mantener un nivel de agua suficiente para servir a la toma de La Bruja y al canal secundario. La Bruja es una toma importante con una capacidad de $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Por lo tanto, se propone reducir la capacidad del canal de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en el km 8 + 800, y proporcionar un canal de desagüe de sifón corriente arriba de la estructura de control. La capacidad de este camino de desecho aún no se ha decidido, pero deberá ser de al menos $10 \text{ m}^3/\text{s}$. El conducto de desagüe será de tipo sifón y se descargará en un drenaje que tiene una capacidad muy grande, tanto en el almacenamiento como en la descarga. El canal en este alcance se llenará completamente de acuerdo con la topografía disponible y tendrá una pendiente de 0.0002.

- Km 8+800 a km 12+280

Se propone ubicar una estructura de control cerrada en el km 12 + 280, inmediatamente aguas arriba del sifón, que mantendrá los niveles de agua necesarios para abastecer las tomas secundarias de Chávez ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) en el kilómetro 9 + 840, Simbila ($0,6 \text{ m}^3/\text{s}$) en el km 10 + 360 y Puyuntalá ($5,3 \text{ m}^3/\text{s}$) en el km 12 + 280. La capacidad máxima de diseño del canal será de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ y se reducirá a $45 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estructura de verificación antes de la entrada al sifón. También se proporcionará un tipo de canal de desagüe de desbordamiento con una capacidad de $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Este vertedero se descargará en un drenaje que se construirá entre el canal y la nueva Carretera Panamericana propuesta y que eventualmente fluirá. También habrá un puente de carretera de dos carriles en este tramo para permitir que la carretera Piura - Catacaos cruce el canal principal. El canal principal se rellenará principalmente a lo largo de este tramo, aunque

la parte inferior del canal siempre estará por debajo del nivel del suelo. Las observaciones del pozo de prueba indican que no se requerirá drenaje a lo largo de este tramo, excepto quizás durante los últimos 200 m antes de la estructura de verificación. Este requisito se puede cambiar posteriormente modificando ligeramente la sección transversal del canal. La pendiente del canal será 0.0002.

- Km 12+280 a km 12+625

El río Piura es atravesado por una estructura de sifón invertido. El sifón a sí mismo tiene 320 m de largo y tiene dos aberturas o tuberías de 2.50 m x 2.75 m. El sifón tiene una capacidad de diseño de 45 m³/s.

- Km 12+625 a km 16+507

Este tramo del canal conecta la estructura del sifón con el inicio del canal Energoprojekt existente. Después de salir del sifón, el canal da un giro brusco para cruzar la nueva carretera Panamericana. En este punto se requiere un puente de carretera de dos carriles, el canal luego pasa junto al dique de protección contra inundaciones existente. Se requerirá drenaje a lo largo de este tramo del canal, ya que una inundación en el río Piura puede causar una elevación repentina en el nivel freático, particularmente en el dique de protección contra inundaciones adyacente. El canal tiene una capacidad de diseño máxima de 45 m³/s y una pendiente de 0.0002.



Capítulo 3

Diseño del sifón Piura

3.1. Diseño del sifón

El Manual de diseño hidráulico de canales y obras de artes (1997), explica que con la información topográfica del perfil del terreno y el perfil de canal, se puede realizar el dimensionamiento del sifón.

Dado que tenemos las características del canal Biaggio Arbulu señaladas en el capítulo 2 y resumidas en la Tabla 2 y 3; y el valor del caudal escogido de los aforos en campo que se detallan en el capítulo 4; podemos verificar el diseño del sifón Piura con sus datos resumidos en la Tabla 4 y comprobar que cumple con los requisitos hidráulicos necesarios. En caso contrario, será necesario ajustar el diseño. Tenemos la información de las cotas del terreno:

Aguas arriba: Km 12+395.68 = 23.70 m.s.n.m.

Aguas abajo: km 12+742.38 = 22.00 m.s.n.m.

Tabla 2. Parámetros para el diseño del canal.

Parámetros del canal	
Z	1.5
Q	31.807 m ³ /s
S	0.0002
b	5 m
n	0.014
Y	2.42 m
V	1.523 m/s

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

Z = talud.

Q = caudal.

S = pendiente del terreno.

b = ancho del canal.

n = coeficiente de rugosidad.

Y = tirante normal.

V = velocidad media del agua.

Tabla 3. Características del canal.

Características del canal	
Cota nivel de agua (condición de entrada)	26.12 m
Cota nivel de agua (condición de salida)	23.26 m
Cota de fondo (condición de entrada)	23.70 m
Cota de fondo (condición de salida)	22.00 m
Y (tirante de entrada)	2.42 m
Y (tirante de salida)	1.253 m
Área (condición de entrada)	20.88 m
Área (condición de salida)	8.62 m
Velocidad del canal (condición entrada)	1.523 m
Velocidad del canal (condición salida)	3.691 m

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Características del sifón.

Características del Sifón	
Área de la tubería	6.875 m
Diámetro de la tubería	2.96 m
Velocidad de la tubería	2.31 m

Fuente: Elaboración propia.

- Longitud de transiciones: para su cálculo debemos tener en cuenta la siguiente fórmula, cuyos parámetros son mostrados en la Figura 15:

$$L_t = \frac{T_1 - T_2}{2 * (\tan \frac{\alpha}{2})} \quad \text{Ecuación 1-23}$$

Donde:

T1 = b + 2 Z Y, espejo de agua en el canal.

T2 = diámetro de la tubería.

α = ángulo que forman los espejos de agua. Considerado $22^\circ - 30^\circ$.

Además, la longitud de la transición de entrada debe ser $L_t = 4$ veces el diámetro.

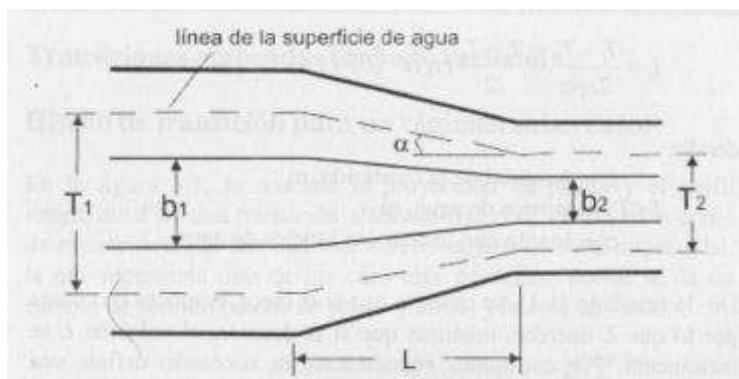


Figura 15. Perfil de planta de una transición en un canal.
Fuente: Villón Béjar, 2005.

- Cotas de fondo: para hallar estos valores, nos apoyaremos en el cálculo geométrico del sifón. Será necesario hacer uso de la siguiente fórmula:

$$\tan \alpha = \frac{\Delta h}{\text{Longitud}} \quad \text{Ecuación 1-24}$$

Donde:

$\Delta h = \text{Cota mayor} - \text{Cota menor}$

Valor de P máximo: como se ve en la Figura 16, se requiere que haya una diferencia máxima de $3/4 D$ entre las secciones 1 y 2 en la entrada del sifón y una diferencia entre las secciones 5 y 6 en la salida del sifón mientras que debe haber una diferencia máxima $1/2 D$ a la salida del sifón.

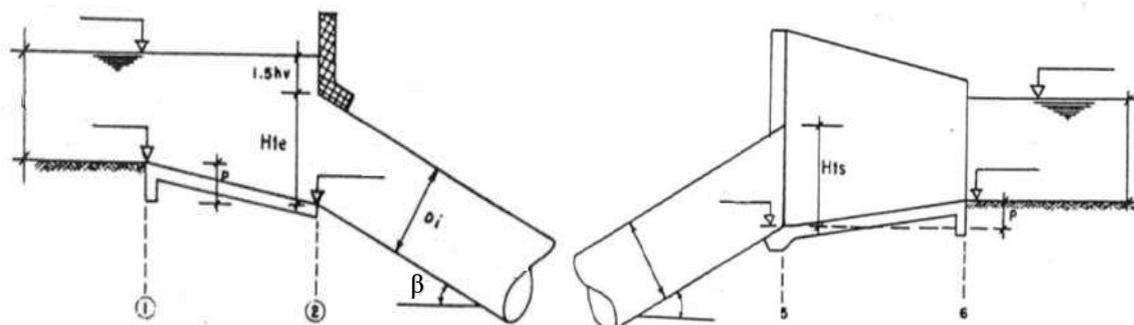


Figura 16. Esquema ilustrativo de la transición de entrada y salida del sifón para el cálculo de "P".
Fuente: Manual de diseño hidráulico de canales y obras de arte, 1997.

Donde:

$1.5 h_v$ = profundidad de sumergencia.

h_v = carga de velocidad.

$$H_{te} = \frac{D_i}{\cos \beta}$$

Gracias a que contábamos con información ya elaborada de la geometría real del sifón Piura, los cuales fueron otorgados por el Proyecto Especial Chira Piura (PECHP) por medio de planos en físico de la estructura (Apéndice A) se continuó con el diseño del sifón Piura, que finalmente podrán ser verificados.

3.2. Cálculo hidráulico del sifón

3.2.1. Cálculo de pérdidas y carga hidráulica

Como ya se explicó en el acápite 1.7, será posible calcular la carga hidráulica disponible gracias a la Ecuación de Bernoulli, la cual nos indica que para cumplirse debe existir una condición, aprovechando que se trata de un sifón invertido que presenta diferencia de alturas, existirá una pérdida de carga entre un punto y el otro, que debe ser mayor a la sumatoria de todas las pérdidas originadas por el sifón. Luego de ello, considerar un aumento del 10 % sobre las pérdidas totales producidas en el sifón, como factor de seguridad. Se utilizará la Ecuación de Bernoulli para poder hacer los cálculos y hallar las presiones en el sifón.

Villón Béjar (2005), nos plantea como calcular las principales pérdidas de carga que se presentan en el sifón:

- Pérdidas por transición de entrada y salida.
- Pérdidas de entrada al conducto.
- Pérdidas por fricción en el conducto.
- Pérdidas por cambio de dirección o codos.
- Pérdidas por válvula de limpieza.

- **Pérdidas por transición de entrada**

$$h_v = 0.1 * \left(\frac{V_t^2}{2 * g} - \frac{V_c^2}{2 * g} \right) \quad \text{Ecuación 1-25}$$

Donde:

V_c = velocidad del canal.

V_t = velocidad de la tubería.

$$h_v = 0.1 * \left(\frac{2.31^2}{2 * g} - \frac{1.523^2}{2 * g} \right)$$

$$h_v = 0.1 * (0.1547)$$

$$h_v = 0.015 \text{ m}$$

- **Pérdidas por transición de salida**

$$h_v = 0.2 * \left(\frac{V_{tubería}^2}{2 * g} - \frac{V_{canal}^2}{2 * g} \right) \quad \text{Ecuación 1-26}$$

$$h_v = 0.2 * \left(\frac{2.31^2}{2 * g} - \frac{3.691^2}{2 * g} \right)$$

$$h_v = 0.2 * (0.4219)$$

$$h_v = 0.084 \text{ m}$$

- **Pérdidas por codos**

Se conoce la longitud de cada sección del sifón, la cual es 9.25 m. Los quiebres o tramos del sifón que mencionamos en la Tabla 5, pueden ser visualizados en el plano elaborado en AutoCAD. (Apéndice A).

$$Pc = 0.25 * \sqrt{\frac{\alpha}{90}} * \frac{V_{tubería}^2}{2 * g}$$

Ecuación 1-27

Tabla 5. Pérdidas por codos en cada tramo del sifón.

	Cota Superior	Cota Inferior	Longitud	α (grados)	Pc
Quiebre 2-3	23.56	20.60	16.50	10.17	0.023
Quiebre 12-13	20.6	15.70	92.50	3.03	0.013
Quiebre 19-20	20.00	15.40	74.00	3.56	0.014
Quiebre 27-28	22.00	20.00	72.25	1.59	0.009
				Total	0.058

Fuente: Elaboración propia.

- **Pérdidas por entrada al conducto**

$$h = Ke * \frac{V_{tubería}^2}{2 * g}$$

Ecuación 1-28

Donde:

V = velocidad de la tubería.

g = gravedad.

Ke = coeficiente que depende de la forma de entrada del conducto, se visualiza en la Tabla 6.

Para una entrada con arista ligeramente redondeada Ke= 0.23.

Tabla 6. Valores de “Ke”

Compuerta en pared delgada – contracción suprimida en los lados y en el fondo.	1
Para entrada con arista en ángulo recto.	0.5
Para entrada con arista ligeramente redondeada.	0.23
Para entrada con arista completamente redondeada R/D = 0.15.	0.10
Para entrada abocinada circular.	0.004

Fuente: Villón Béjar, 2005.

$$h = 0.23 * \frac{2.31^2}{2 * 9.81}$$

$$h = 0.063 \text{ m}$$

- **Pérdidas por fricción en el conducto.**

La Tabla 7 muestra los valores que puede asumir la irregularidad de la superficie según su tipo de revestimiento en el conducto.

Tabla 7. Valores de “e” para distintos materiales en tubería.

Tipo de Revestimiento	Condición nuevo-viejo	Valor normal de diseño
Latón	0.0015	0.0015
Cobre	0.0015	0.0015
Hormigón	0.3 a 3	1.2
Hierro galvanizado	0.06 a 0.24	0.15
Acero comercial	0.03 a 0.09	0.06
Acero Roblonado	0.9 a 9	1.8
Madera	0.18 a 0.9	0.6

Fuente: Mott & Untener, 2015.

$$f = \frac{0.25}{\left(\log\left(\frac{e}{3.7 * D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right)^2} \quad \text{Ecuación 1-29}$$

Donde:

D: diámetro de la tubería.

Re: número de Reynolds.

e: tamaño de las irregularidades en la superficie (mm).

f: factor de fricción.

$$Re = \frac{V_{tubería} * Diámetro}{u} \quad \text{Ecuación 1-30}$$

Donde:

u: viscosidad cinemática del agua.

Re: número de Reynolds.

$$Re = \frac{2.31 * 2.96}{10^{-6}}$$

$$Re = 6844014.38$$

$$f = \frac{0.25}{(\log(\frac{1.2 * 10^{-3}}{3.7 * 2.96} + \frac{5.74}{6844014^{0.9}}))^2}$$

$$f = 0.016$$

$$hf = f * \frac{\text{Longitud}}{\text{Diámetro}} * \frac{V_{\text{tubería}}^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación 1-31}$$

$$hf = 0.016 * \frac{320}{2.96} * \frac{2.31^2}{2 * 9.81}$$

$$hf = 0.475 \text{ m}$$

Donde:

hf : pérdida de carga por fricción en el conducto.

- **Pérdidas totales**

La Tabla 8 muestra un resumen de las pérdidas totales calculadas en todo el tramo del sifón.

Tabla 8. Valores de las pérdidas totales en el sifón.

Pérdidas totales	
Por transición de entrada	0.015
Por transición de salida	0.084
Por codos	0.058
Entrada al conducto	0.063
Por fricción en el conducto	0.475
Por válvulas de limpieza	Despreciable
Pérdidas totales	0.527
Con factor de seguridad (10%)	0.580

Fuente: Elaboración propia.

- **Carga hidráulica admisible**

$$\Delta H = \frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) = (E1 - E2) \quad \text{Ecuación 1-32}$$

Donde:

p = presión en la tubería.

γ = peso específico.

z = elevación.

g = gravedad.

v = velocidad en la tubería.

$E1, E2$ = energía total en las secciones 1 y 2.

$$E1 = \frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g}$$

$$E1 = 0 + (23.56 + 2.42) + \frac{1.523^2}{2 * 9.81}$$

$$E1 = 26.0983 \text{ m}$$

$$E2 = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$E2 = 0 + (22 + 1.253) + \frac{3.691^2}{2g}$$

$$E2 = 23.9477 \text{ m}$$

$$\Delta H = E1 - E2 = 2.151 \text{ m}$$

Vemos que el valor de las pérdidas totales, adicionando un 10% de seguridad, es 0.5800 m, mientras que el valor de la variación de carga hidráulica es 2.151 m. Esto significa que la estructura no presenta problema hidráulico, dado que las pérdidas totales son menores a la carga hidráulica. El diseño del sifón es correcto puesto que cumple con los requisitos hidráulicos.

En caso de haber obtenido un resultado contrario, es decir que las pérdidas totales hayan sido mayores a la carga hidráulica, los cambios que pudieron haberse realizado son:

- Aumentar las dimensiones de las tuberías.
- El desnivel entre el canal de entrada y salida deberá variar.

3.2.2. Cálculo de las presiones

Apoyados de igual forma en el acápite 1.7, según Mott & Untener (2015), el cálculo de las presiones en el interior del sifón será posible calcularla gracias a la Ecuación de Bernoulli. Además de tener presente las características del canal Biaggio Arbulú, tanto en la entrada como a la salida, la ecuación de Bernoulli se podrá aplicar fácilmente en tuberías llenas. La ecuación establece que en el fluido la energía total permanece constante y es válido sólo para fluidos incompresibles. La ecuación de la conservación o ecuación de Bernoulli se muestra a continuación:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1-32}$$

Donde:

p = presión en la tubería.

γ = peso específico.

z = elevación.

g = gravedad.

v = velocidad en la tubería.

Los puntos que tomaremos para realizar el cálculo de las presiones son un punto A localizado sobre la superficie del canal y los tramos con cambio de dirección dentro del sifón. Por ejemplo, observamos en la Figura 17 la ubicación del punto A y el tramo 2-3 del sifón para el cálculo de las presiones.

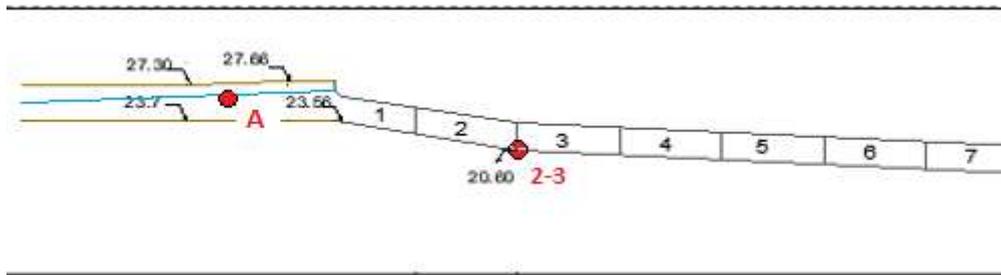


Figura 17. Ubicación del punto A y el tramo 2-3 del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

1.1. Punto A del canal y tramo 2-3.

$$0 + (23.70 + 2.42) + \frac{1.523^2}{2 * 9.81} = \frac{p_{2-3}}{\gamma} + 20.6 + \frac{2.31^2}{2 * 9.81}$$

$$4.5475 = \frac{p_{2-3}}{\gamma}$$

$$p_{2-3} = 44611 \text{ Pa.}$$

2.1. Punto A del canal y tramo 19-20

$$0 + (23.70 + 2.42) + \frac{1.523^2}{2 * 9.81} = \frac{p_{19-20}}{\gamma} + 15.40 + \frac{2.31^2}{2 * 9.81}$$

$$9.7475 = \frac{p_{19-20}}{\gamma}$$

$$p_{19-20} = 95623 \text{ Pa.}$$

3.1. Punto A del canal y tramo 27-28

$$0 + (23.70 + 2.42) + \frac{1.523^2}{2 * 9.81} = \frac{p_{27-28}}{\gamma} + 20 + \frac{2.31^2}{2 * 9.81}$$

$$5.1475 = \frac{p_{27-28}}{\gamma}$$

$$p_{27-28} = 50497 \text{ Pa.}$$

Al escribir la Ecuación de Bernoulli es importante que las presiones existentes en los dos puntos de referencia se expresen ambas como presiones absolutas o bien como presiones manométricas. Es decir, ambas deben tener la misma presión de referencia.

Para todos los cálculos hechos, fue conveniente utilizar la presión manométrica porque las partes del sistema de fluidos expuestas a la atmosfera tendrán presión cero, logrando calcular la presión sobre los tramos en el interior del sifón cuando ocurriera un cambio de dirección.

Concluimos este capítulo indicando que hemos verificado el diseño del sifón Piura, comprobando que cumple con los requisitos hidráulicos necesarios. No fue necesario realizar un ajustar sobre el diseño.

Posteriormente se realizará una comparación de los valores hallados en el cálculo hidráulico del sifón con los resultados obtenidos de la modelación.



Capítulo 4

Instrumentos de medición del flujo de agua para el sifón Piura

4.1. Aforo en el canal

4.1.1. Características de la sección de aforo

Marbello Pérez (2005) , describe los procedimientos para la realización de ensayos de campo de hidráulica, las mediciones requeridas y así obtener las ecuaciones para efectuar los cálculos hidráulicos y presentar los resultados de éste. Para el correcto uso de los instrumentos de medición, la sección donde se realice el aforo debe cumplir los siguientes requisitos:

- Debe presentar velocidades mayores que 0.3 m/s (o mayor que la mínima recomendable para el correntómetro empleado) y menores que 3.0 m/s (o menor que la máxima recomendable para el correntómetro empleado).
- Debe presentar características altoplanimétricas regulares, es decir regularidad en los perfiles longitudinal y transversal del cauce, con el objeto de garantizar un escurrimiento tranquilo y uniforme, libre de fuertes turbulencias, y que pueda ser útil en el caudal para mediciones puntuales o continuas.
- Por seguridad propia y evitar correr cualquier riesgo, se indica que la sección debe ser de fácil acceso.
- Situado dentro de una longitud de tramo recto y uniforme no menor de siete veces el ancho del río, con aguas arriba, mínimo cinco veces el ancho y aguas abajo mínimo dos veces el ancho. Sin embargo, dadas las características del lecho, no es posible encontrar tal rectitud y tal uniformidad del tramo.
- El fondo del río debe ser suave y libre de plantas acuáticas, piedras u otros obstáculos, para evitar que puedan interferir en la medición de la velocidad de la corriente.
- Deben evitarse las secciones cercanas a los estribos de los puentes.
- Para garantizar una sección firme y estable sería conveniente revestirla en concreto, mampostería o con placas prefabricadas.

- La sección adecuada debe estar alineada perpendicularmente a la dirección de la corriente. En los extremos unos apoyos se instalarán en el nivel de aguas máximas y un apoyo central en un nivel de aguas medias de la corriente.

4.1.2. Instrumentos hidrométricos

Son artefactos e instrumentos de medida necesarios para realizar mediciones de campo en relación con corrientes de agua. Los instrumentos hidrométricos más comunes en las estaciones hidrométricas son:

- Limnímetros
- Limnígrafos
- Sondas
- Ecosondas
- Secciones de control artificial
- Estructuras temporales para medición de caudales
- Puente hidrométricos
- Tarabita o canastilla
- Correntómetro

4.1.3. Métodos para aforar

Son aquellas actividades hidrométricas que ayudan a determinar el caudal de un flujo de agua. Para las principales actividades hidrométricas realizadas en un aforo, se cuentan el perfil transversal de la sección de aforo, las velocidades de flujo y las mediciones de profundidades en distintos puntos de la sección transversal. Tenemos, por ejemplo:

- Método volumétrico
- Método del flotador
- Medidor Parshall
- Método con correntómetro
- Método con vertederos y canaletas
- Método con trazadores fluorescentes o colorantes
- Método con trazadores químicos y radioactivos
- Método de la curva de distribución de velocidades

4.2. Correntómetro

El correntómetro es un instrumento de medición llamado también molinete o reómetro. Dependiendo del tipo de modelo se logra registrar la velocidad, dirección, profundidad e inclinación respecto de la vertical, temperatura, presión y conductividad del flujo de agua en alcantarillados, mares, ríos, estuarios, bahías, arroyos y quebradas. El tamaño de correntómetro varía según la magnitud del caudal, es decir mientras mayor sea el caudal, mayor debe ser el tamaño del instrumento. En cuanto a su fabricación, la Figura 18 nos ilustra que está compuesto de una hélice que gira en un eje, por efecto de la corriente de agua. Por cada vuelta que dé la hélice, hay un imán que gira con ésta, estableciendo un contacto eléctrico que envía una señal a un contador de revoluciones. La sucesión de los contactos y señales es proporcional a la velocidad de la corriente en el punto de medición, la cual se puede calcular a partir de una ecuación de calibración, la misma que figura en el certificado de calibración que tiene el instrumento. (Marbello Pérez, 2005, págs. 242-245)



Figura 18. Correntómetro y accesorios.

Fuente: Marbello Pérez, 2005.

Una fórmula de calibración, como la empleada en nuestro estudio, es la siguiente:

$$v = a + bn$$

Ecuación 1-33

Donde:

v: velocidad de la corriente líquida, (m/s).

n: número de revoluciones dadas por la hélice en la unidad de tiempo, (rad/s).

b: constante de paso hidráulico, obtenida experimentalmente a través de ensayos de arrastre en un canal de calibración, (m).

a: constante que considera la inercia de la hélice y la mínima velocidad de la corriente para accionarla. Se expresa en m/s y también se determina experimentalmente.

4.2.1. Aforo con correntómetro

Cuando se desea determinar el caudal, es importante conocer la distribución de velocidades en una corriente libre. Para ello, se utilizará un medidor de velocidad, que es un instrumento diseñado de tal manera que la velocidad angular de su elemento giratorio como hélices o sistema de álabes, sea proporcional a la velocidad de la corriente.

El sistema de medición de velocidad con correntómetro es el siguiente: supóngase colocar el correntómetro en un punto de una corriente que tiene una velocidad “v”. La longitud “s” representa el recorrido de una partícula fluida moviéndose a lo largo del contorno completo de la línea que determina una vuelta de la hélice, es decir, recorriendo una vuelta completa de la hélice. La situación es análoga al suponer quieta el agua y el molinete desplazándose a través de ésta con velocidad “v”. Para un desplazamiento “s”, la hélice también dará una vuelta. (Marbello Pérez, 2005, págs. 259,260).

Para un movimiento uniforme:

$$v = \frac{s}{t}$$

Ecuación 1-34

El espacio “s” recorrido por la hélice o por la partícula líquida a través de ésta, se representa por el número de rotaciones “N” que da el correntómetro en “t” segundos.

$$v = \frac{N}{t}$$

Ecuación 1-35

Como existen fricciones en las partes mecánicas del aparato, es necesario introducir un coeficiente de corrección “b”

$$v = b \frac{N}{t}$$

Ecuación 1-36

Y haciendo $n=N/t$, la frecuencia de giro se tiene:

$$v = b n$$

Ecuación 1-37

Dado que la sensibilidad del aparato se hace sentir a partir de determinada velocidad mínima “a”, que en general, es del orden de 1 cm/s por debajo de la cual el aparato no se mueve, la ecuación del correntómetro se transforma en:

$$v = a + bn \quad \text{Ecuación 1-38}$$

Esta ecuación corresponde a una línea recta. Los instrumentos vienen con su respectiva ecuación de calibración, otorgadas en los laboratorios de hidráulica y dependiendo del tipo de correntómetro; traen tabuladas las velocidades en función del número de revoluciones por minuto. La empleada en nuestro estudio la del correntómetro Current Meter No 108541 de sistema OTT C31, con la siguiente ecuación:

$$v = 0.004 + 0.2596 n \quad \text{Ecuación 1-39}$$

Conocida la ecuación de calibración, podremos obtener la velocidad media de un curso de agua. Para ello debemos medir la velocidad en dos, tres o más puntos ubicados a diferentes profundidades de la sección del canal. El lugar o punto donde se va a efectuar la medición, se conoce como la sección transversal del curso de agua.

Las profundidades recomendadas en las cuales se toma la lectura del correntómetro se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9. Valor de las pérdidas totales en el sifón.

Tirante "d" (cm)	Profundidad de lectura del correntómetro(cm)
<15	d/2
15<d<45	0.6d
>45	0.2d y 0.8d ó 0.2d, 0.6d y 0.8d

Fuente: Proyecto Subsectorial de irrigación (2005)

Según el Proyecto Subsectorial de irrigación (2005), en su manual de hidrometría indica que con el correntómetro se mide la velocidad en la misma vertical a 0.2d y a 0.8d ó 0.2d, 0.6d y 0.8d de la profundidad de la vertical, para lo cual se toma el tiempo que demora el correntómetro en dar 100 revoluciones o las que creamos conveniente y se calcula el número

de revoluciones por segundo; con este dato se calcula la velocidad del agua en cada una de las profundidades utilizando la fórmula correspondiente, según el número de revoluciones por segundo (n).

Se obtiene la velocidad promedio del agua en cada vertical. La velocidad promedio del agua en cada subsección es el promedio de las velocidades promedio de las verticales, que encierran la subsección.

El área de cada subsección se calculará fácilmente considerándola como una figura geométrica conocida: trapecio, cuya base (ancho del tramo) se multiplica por el promedio de las profundidades que delimitan dicha subsección.

El caudal de agua que pasa por una subsección se obtiene multiplicando su área por el promedio de las velocidades medias registradas, en cada extremo de dicha subsección.

El caudal total de agua será la suma de los caudales que pasan por las subsecciones, se calculará con la fórmula:

$$Q = A \times v \quad \text{Ecuación 1-40}$$

v = velocidad promedio determinada con el correntómetro o molinete.

A = área de la sección mojada transversal.

Para este proyecto de tesis, el método de aforo con correntómetro realizado en campo para la determinación de la velocidad media del flujo en la vertical es el método 0.6d y método de la medición subsuperficial, los cuales se explicarán en los siguientes apartados.

4.2.2. Método 0.6d

Según Marbello Pérez (2005), se lleva a cabo una medición de velocidad a 0.6d medidos desde la superficie libre. Esta velocidad se considera ser la velocidad media en la vertical, imaginando que la distribución de velocidades se asemeja a un arco de parábola, en el caso la abscisa media se encuentra entre 0.58d y 0.62d, desde la superficie.

Este método fue aplicado en los ensayos de campo, ya que el tirante del canal tenía una altura promedio de 2 m. Se recomienda su aplicación en corrientes de profundidad regular. Sería impracticable la aplicación de cualquier otro método dado que la hélice del correntómetro

podría tocar el fondo del lecho, cuando se le coloque por ejemplo a 0.8h desde la superficie libre.

4.2.3. Método de la medición sub-superficial

Se lleva a cabo una medición de la velocidad en un punto por debajo de la superficie del agua, situado aproximadamente a 0.2d para estimar la velocidad media en la vertical. Cuando no se pueda realizar aforos más detallados por distintos impedimentos de la zona, el procedimiento de este método simplifica los aforos en secciones ya trabajadas. (Marbello Pérez, 2005, pág. 262).

4.3. Método del flotador

Los aforos con flotadores son los más sencillos de realizar, pero también son los más imprecisos y son utilizados cuando no se tiene equipos de medición, para lo cual se debe conocer el área de la sección y la velocidad del flujo de agua.

Gracias a este método se calcula aproximadamente las velocidades superficiales de la corriente de un canal o río, utilizando materiales sencillos tales como: botellas, latas, troncos, varillas con un lastre, entre otros objetos, es decir cualquier objeto que pueda flotar. (Chamorro, 2011).

4.3.1. Características de un flotador

Según Chamorro (2011), un flotador debe cumplir con las siguientes características:

- El flotador puede ser trozos de ramas, pequeños troncos, botellas, latas de leche, etc.
- En caso de utilizar botellas como flotadores éstos serán tapados herméticamente y parcialmente llenas de agua ($\frac{3}{4}$ partes de la botella).
- Es importante que el flotador quede sumergido una gran parte y emergente lo necesario durante el aforo, esto permitirá que el flotador no sea influenciado por el viento y cambie de dirección fácilmente, lo que implicaría velocidades inexactas.
- Los flotadores deben ser similares en forma y peso.
- A cada flotador se le debe colocar un distintivo de color a fin de que sean observados durante su trayectoria.

4.3.2. Aplicaciones del método

- Existen niveles de agua que son muy bajos y no permite medir con el correntómetro.
- Cuando existe peligro para ingresar a la zona el observador hidrológico.
- Peligra el equipo de correntómetro de sufrir daño en sus hélices o desprenderse de la varilla que lo sujete, durante un periodo de máximas avenidas o crecidas de los ríos.
- No disponibilidad de un correntómetro o equipos de aforo.
- La presencia de agentes externos como algas o sedimentos que impiden que se haga mediciones con el correntómetro.
- Evita la construcción de una estación hidrométrica costosa, cuando se desea conocer el caudal de la corriente en forma aproximada.

4.3.3. Procedimiento del método

Según Torres (2018), los pasos de aplicación para este método son los siguientes:

- A) Seleccionar un lugar adecuado para realizar el aforo, esto implica conocer el área de la sección. En nuestro caso, tenemos un canal de forma trapezoidal, en el cual conocemos las dimensiones siendo así fácil de introducir en la fórmula. Además, medir la distancia que recorrerá el flotador desde el punto inicial A hasta el punto final B.
- B) Cálculo del tiempo promedio.
- Se toma en cuenta el tiempo que demoran los flotadores de llegar del punto inicial A hasta el punto final B. Se debe contar con un medidor de tiempo.
 - Se deben lanzar como mínimo tres veces los flotadores en el margen derecho, en el centro y en el margen izquierdo de la sección del río o canal como se ve en la Figura 19. Sea el caso de un canal con sección pequeña, se lanza el flotador en el centro de la sección.

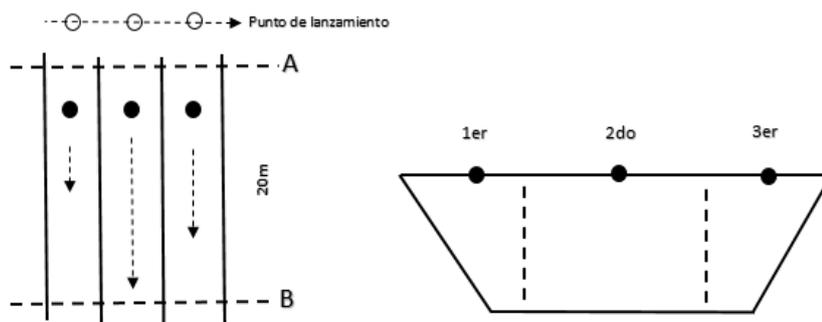


Figura 19. Esquema ilustrativo del aforo con flotador.

Fuente: Elaboración propia.

- Para calcular el tiempo promedio se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_p = \frac{t_{f1} + t_{f2} + t_{f3} + \dots + t_{fn}}{N} \quad \text{Ecuación 1-41}$$

Donde:

T_p = tiempo promedio (s).

t_f = tiempo que transcurre cada flotador (s).

N = número de veces lanzados los flotadores.

- C) Con el tiempo estimado, se calcula la velocidad superficial del río o canal, por medio de la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{d}{T_p} \quad \text{Ecuación 1-42}$$

Donde:

V_s = velocidad superficial (m/s)

d = distancia recorrida del flotador (m).

T_p = tiempo promedio que recorre los flotadores (s).

- D) La velocidad media (V_{med}) será asumida como el valor de la velocidad corregida, es decir el valor es igual a la velocidad superficial multiplicada por un factor de corrección. Para los diferentes tipos de cauces el factor de corrección se selecciona de acuerdo a la Tabla 10.

Tabla 10. Determinación de factor de corrección Fc para el cálculo de caudales por el método del flotador.

Tipo de cauce	Factor de corrección FC
Canal revestido en concreto, profundidad del agua > 15 cm	0.85
Canal en Tierra, profundidad del agua > 15 cm	0.7
Riachuelos profundidad del agua > 15 cm	0.5
Canal en Tierra, profundidad del agua < 15 cm	0.25 – 0.5

Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego, 2014.

E) Con los datos obtenidos se procede a calcular el caudal, con la siguiente ecuación:

$$Q = A \times V_{med} \quad \text{Ecuación 1-43}$$

Donde:

A = área de la sección (m²).

Q = caudal (m³/s).

V_{med} = velocidad media (m/s).

4.4. Cálculos y resultados

Teniendo en cuenta las características y aplicaciones del método con correntómetro y el método con flotadores, se realizaron los ensayos sobre tramos del canal principal Biaggio Arbulú de fácil acceso y que contaba con seguridad propia, ayudando a mitigar cualquier riesgo.

Los resultados obtenidos nos muestran valores de velocidad, tirante y caudal promedio, verificando que los cálculos realizados por ambos métodos son viables en la aplicación de corrientes o flujos conocidos en canales abiertos; además son una opción de ahorro económico ya que es bastante práctico y eficiente para la determinación de la velocidad y el caudal con precisión de una sección del canal.

4.4.1. Cálculos con correntómetro

Se aplicó el método del correntómetro en el tramo del canal Biaggio Arbulú localizado en Km 0+000 a km 0+170, en este tramo del canal se une la Bocatoma a la primera estructura

de control en el canal. La finalidad de este método es hallar los parámetros de velocidad y caudal promedio en una sección del canal principal, el cálculo se muestra en la Tabla 11, 12, 13 y 14 dividido por tramos de la sección.

Para una adecuada medición de caudales se deberá verificar que el tramo del canal se encuentre libre de residuos, piedras o algún otro material, los cuales puedan interferir con el propulsor del correntómetro, asegurando que la hélice gire libremente.

Tabla 11. Extremo izquierdo del canal - método correntómetro.

Xi	H	Profund. Obser.	Revol	Veloc. Corrent.	Veloc. Prom.	Ancho	h	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
0	0	0	0	0					
0.133	0.0887	0.0532	55	0.286	0.222	0.265	0.089	0.023	0.005
0.265	0.177	0.106	73	0.379					
0.765	0.5100	0.306	96	0.499	0.504	1.000	0.510	0.510	0.257
1.265	0.8433	0.506	122	0.634					
1.765	1.1767	0.706	145	0.753	0.734	1.000	1.177	1.177	0.864
2.265	1.5100	0.906	157	0.815					
2.765	1.8433	1.106	180	0.935	0.909	1.00	1.843	1.843	1.675
3.265	2.1767	1.306	188	0.976					
3.765	2.5100	1.506	199	1.033	1.018	1.00	2.510	2.510	2.554
4.265	2.8433	1.706	201	1.044					
4.765	3.1767	1.906	195	1.013	1.045	1.00	3.177	3.177	3.321
5.265	3.5100	2.106	208	1.080					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Extremo derecho del canal - método correntómetro.

Xi	H	Profund. Obser.	Revol	Veloc. Corrent.	Veloc. Prom.	Ancho	h	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
0	0	0	0	0					
0.133	0.0887	0.0532	55	0.286	0.222	0.265	0.089	0.023	0.005
0.265	0.177	0.106	73	0.379					
0.765	0.5100	0.306	96	0.499	0.504	1.000	0.510	0.510	0.257
1.265	0.8433	0.506	122	0.634					
1.765	1.1767	0.706	145	0.753	0.734	1.000	1.177	1.177	0.864
2.265	1.5100	0.906	157	0.815					

Xi	H	Profund. Obser.	Revol	Veloc. Corrent.	Veloc. Prom.	Ancho	h	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
2.765	1.8433	1.106	180	0.935	0.909	1.00	1.843	1.843	1.675
3.265	2.1767	1.306	188	0.976					
3.765	2.5100	1.506	199	1.033	1.018	1.00	2.510	2.510	2.554
4.265	2.8433	1.706	201	1.044					
4.765	3.1767	1.906	195	1.013	1.045	1.00	3.177	3.177	3.321
5.265	3.5100	2.106	208	1.080					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Centro del canal - método correntómetro.

Xi	H	Profund. Obser.	Revol	Veloc. Corrent.	Veloc. Prom.	Ancho	h	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
5.765	3.51	2.106	235	1.2202	1.212	1.000	3.510	3.510	4.253
6.265	3.5100	2.106	257	1.334					
6.765	3.510	2.106	303	1.573	1.532	1.000	3.510	3.510	5.376
7.265	3.5100	2.106	325	1.687					
7.765	3.5100	2.106	338	1.755	1.727	1.000	3.510	3.510	6.063
8.265	3.5100	2.106	335	1.739					
8.765	3.5100	2.106	324	1.682	1.694	1.000	3.510	3.510	5.947
9.265	3.5100	2.106	320	1.662					
9.765	3.5100	2.106	308	1.599	1.514	1.000	3.510	3.510	5.316
10.265	3.5100	2.106	247	1.283					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Cálculos del caudal realizados con el método correntómetro.

	Área(m ²)	Caudal(m ³ /s)	Velocidad(m/s)
Extremo izquierdo	9.240	8.676	1.229
Extremo derecho	9.240	8.671	
Centro del canal	17.550	26.955	
	36.030	44.301	

Fuente: Elaboración propia.

En este tramo del canal, ubicado en Km 8+500 a km 8+800, se localiza el canal secundario La Bruja, el cual se propone reducir la capacidad del canal de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ y proporcionar un canal de desagüe de sifón corriente arriba de la estructura de control. La Tabla 15 y 16, nos muestra detalle del aforo realizado con el correntómetro para el cálculo del caudal promedio y la velocidad. La Figura 20 ilustra el momento en que se realizó el aforo.

Tabla 15. Canal La Bruja - método correntómetro.

Xi	H	Profund. Obser.	Revol	Veloc. Corrent.	Veloc. Prom.	Ancho	h	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
0	1.30	0.52	252	1.308					
0.375	1.30	0.52	252	1.308	1.319	0.750	1.300	0.975	1.286
0.75	1.30	0.52	258	1.340					
1.125	1.30	0.52	257	1.334	1.303	0.750	1.300	0.975	1.271
1.5	1.30	0.52	238	1.236					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Cálculos del caudal - método correntómetro.

Área(m ²)	Caudal(m ³ /s)	Velocidad(m/s)
1.950	2.557	1.311

Fuente: Elaboración propia.



Figura 20. Aforo en el canal La Bruja.

Fuente: Elaboración propia.

También se aplicó el método del correntómetro en otro tramo del canal Biaggio Arbulú localizado en Km 8+800 a km 12+280. Las Tablas 17, 18, 19 y 20 muestran los resultados del aforo que se realizó en el puente frente a Aqualandia, como vemos en la Figura 21.

Tabla 17. Extremo izquierdo del canal - método correntómetro.

Xi	H	Profund. Obser.	Revol	Veloc. Corrent.	Veloc. Prom.	Ancho	h	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
0	0	0	0	0					
0.133	0.0887	0.0532	119	0.618	0.459	0.265	0.089	0.023	0.011
0.265	0.177	0.106	146	0.758					
0.765	0.5100	0.306	257	1.334	1.217	1.000	0.510	0.510	0.621
1.265	0.8433	0.506	300	1.558					
1.765	1.1767	0.706	315	1.636	1.620	1.000	1.177	1.177	1.906
2.265	1.5100	0.906	321	1.667					
2.765	1.8433	1.106	308	1.599	1.606	1.000	1.843	1.843	2.961
3.265	2.1767	1.306	299	1.552					
3.765	2.5100	1.506	281	1.459	1.004	1.000	2.510	2.510	2.520
4.265	2.8433	1.706	300	1.558					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Extremo derecho del canal - método correntómetro.

Xi	H	Profund. Obser.	Revol	Veloc. Corrent.	Veloc. Prom.	Ancho	h	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
0	0	0	0	0					
0.133	0.088	0.0532	119	0.618	0.459	0.265	0.089	0.023	0.011
0.265	0.177	0.106	146	0.758					
0.765	0.510	0.306	257	1.334	1.217	1.000	0.510	0.510	0.621
1.265	0.843	0.506	300	1.558					
1.765	1.176	0.706	315	1.636	1.620	1.000	1.177	1.177	1.906
2.265	1.510	0.906	321	1.667					
2.765	1.843	1.106	308	1.599	1.606	1.000	1.843	1.843	2.961
3.265	2.176	1.306	299	1.552					
3.765	2.510	1.506	281	1.459	1.004	1.000	2.510	2.510	2.520
4.265	2.843	1.706	300	1.558					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Centro del canal - método correntómetro.

Xi	H	Profund. Obser.	Revol	Veloc. Corrent.	Veloc. Prom.	Ancho	h	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
3.765	2.510	1.506	313	1.625					
4.265	2.510	1.506	320	1.662	1.617	1.000	2.510	2.510	4.057
4.765	2.510	1.506	301	1.563					
5.265	2.510	1.506	294	1.527	1.551	1.000	2.510	2.510	3.892
5.765	2.510	1.506	301	1.563					
6.265	2.510	1.506	280	1.454	1.525	1.000	2.510	2.510	3.827
6.765	2.510	1.506	300	1.558					
7.265	2.510	1.506	319	1.656	1.604	1.000	2.510	2.510	4.027
7.765	2.510	1.506	308	1.599					
8.265	2.510	1.506	269	1.397	1.426	1.000	2.510	2.510	3.580
8.765	2.510	1.506	247	1.283					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Cálculos del caudal realizados con el método correntómetro.

	Área(m ²)	Caudal(m ³ /s)	Velocidad(m/s)
Extremo izquierdo	6.063	8.018	1.435
Extremo derecho	6.063	8.007	
Centro del canal	12.550	19.384	
	24.677	35.419	

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 21.** Aforo en puente Aqualandia.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Cálculos con flotadores

Se aplicó el método con flotadores en el tramo del canal principal Biaggio Arbulú localizado en Km 12+369 a km 12+625, lugar donde se encuentra el sifón Piura. Se aplicó este método en la entrada del sifón, como se ve en la Figura 22 y en la salida del sifón, como se ve en la Figura 23. Los cálculos se muestran en la Tabla 21 y 22.

Tabla 21. Cálculos del caudal en la entrada del sifón - método flotador.

Páram.	Tiempo (s)	Distan (m)	Velocidad (m/s)	Veloc. Prom. (m/s)	Factor de corrección de veloc.	Veloc. Correg. (m/s)	Tirant (m)	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
t1	14.25	20	1.404	1.692	0.85	1.523	2.420	20.885	31.807
t2	10.41	20	1.921						
t3	10.95	20	1.682						
t4	11.23	20	1.781						
t5	11.02	20	1.815						
t6	12.96	20	1.550						
t7	12.38	20	1.616						
T8	13.22	20	1.513						
T9	11.04	20	1.812						
T10	11.82	20	1.692						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Cálculos del caudal en la salida del sifón - método flotador.

Páram.	Tiempo (s)	Distan (m)	Velocidad (m/s)	Veloc. Prom. (m/s)	Factor Corrección de veloc	Veloc. Corregida (m/s)	Tirante (m)	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
t1	14.19	20	1.409	1.601	0.85	1.441	2.42	20.885	30.099
t2	13.51	20	1.480						
t3	12.07	20	1.657						
t4	12.29	20	1.627						
t5	11.08	20	1.805						
t6	12.28	20	1.629						
t7	13.58	20	1.473						
T8	13.42	20	1.490						
T9	11.15	20	1.794						
T10	12.15	20	1.646						

Fuente: Elaboración propia.



Figura 22. Aforo en la entrada del sifón.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 23. Aforo en la salida del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. Discusión de resultados

El método con flotadores nos puede dar resultados inexactos si se compara con el método del correntómetro. El aforo con flotadores señala que existe más probabilidad de error ya que existen muchos factores que harán variar los datos obtenidos, tales como: los vientos, turbulencias en el agua, arrastre de sedimentos, forma irregular del canal, etc. Entonces se deben realizar repeticiones consecutivas de las pruebas, para poder tener un nivel de confiabilidad aceptable y así obtener un caudal con mayor precisión, como fue el caso de nuestras pruebas realizadas cerca a la entrada y salida del sifón Piura. Los caudales obtenidos mediante este método fueron $31.807 \text{ m}^3/\text{s}$ y $30.099 \text{ m}^3/\text{s}$. en la entrada y salida del sifón respectivamente. Además, se consideró un factor de corrección de velocidad de la Tabla 9, según el tipo de flujo

que atraviesa se trata de un canal revestido de concreto, por lo tanto, el factor considerado es 0.85.

El método del correntómetro nos entrega caudales más reales y aceptables, ya que se utiliza un instrumento de medición y un punto de apoyo seguro donde se encontrará la persona encargada de realizar el aforo. Este método permitió hallar el caudal, teniendo primero que la velocidad es medida directamente del correntómetro a una altura de $0.6d$ medidos desde la superficie libre, tal como lo explica el método $0.6d$; para luego tener el área de la sección transversal del canal y finalmente tener el caudal promedio y la velocidad promedio de los tramos aforados a lo largo del canal Biaggio Arbulu. Se obtuvieron caudales de $44.301 \text{ m}^3/\text{s}$, $2.557 \text{ m}^3/\text{s}$ y $35.419 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se realizó un aforo en el canal secundario La Bruja, con el fin de estimar una reducción de caudal sobre el canal al cruzar una estructura de control cerrada en el $\text{km } 12 + 280$. En este punto de la estructura de control la capacidad máxima de diseño del canal será de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ y se reducirá a $45 \text{ m}^3/\text{s}$ antes de la entrada al sifón. Dados los resultados de nuestros aforos se encontró caudales de $35.419 \text{ m}^3/\text{s}$ y $31,807 \text{ m}^3/\text{s}$, los cuales se encuentran dentro del rango que propone el diseño del canal y su capacidad máxima.

Finalmente, la sección donde se realice el aforo debe superar las restricciones explicadas para cada método y así ayudará a determinar que método es más eficaz y el correcto uso de los instrumentos de medición. Sin embargo, no hay que dejar de mencionar que ambos métodos entregan resultados favorables.

Capítulo 5

Los modelos numéricos

5.1. Dinámica de fluidos computacional – CFD

5.1.1. Comportamiento básico de los fluidos

Para desarrollar un estudio de comportamiento de fluidos, es básico conocer la definición de fluido, es cual dice ser un conjunto de partículas que se mantienen unidas entre sí por fuerzas cohesivas débiles y las paredes de un recipiente; englobando a los líquidos y los gases. Antes de analizar un fluido, es importante conocer a que llamamos flujo compresible o incompresible.

Según Ferziger & Milovan (2002), los fluidos son sustancias cuya estructura molecular no ofrece resistencia a las fuerzas de corte externas. Incluso la fuerza más pequeña provoca la deformación de una partícula de fluido. El flujo de fluido es causado por la acción de fuerzas externamente, aquellas siendo consideradas como diferencias de presión, gravedad, cizallamiento, rotación y tensión superficial. Se pueden clasificar como fuerzas de superficie, por ejemplo, la fuerza de corte debido al viento que sopla sobre el océano o las fuerzas de presión y corte creadas por un movimiento de una pared rígida en relación con el fluido y las fuerzas del cuerpo como la gravedad y las fuerzas inducidas por la rotación.

Para el estudio del movimiento de fluidos, se debe tener muy en cuenta sus propiedades, que, si bien difieren considerablemente, todas ellas se comportan de manera similar bajo la acción de fuerzas. Las propiedades más importantes de los fluidos simples son la densidad y la viscosidad, mientras que otras están en función de otras variables como la termodinámica como la temperatura y presión. Existen otros fenómenos que afectan el flujo de fluidos, se incluye las diferencias de temperatura que conducen a la transferencia de calor y diferencias de densidad que dan lugar a la flotabilidad.

Estos fenómenos y las diferencias en la concentración de solutos, pueden afectar significativamente los flujos o ser la única causa del flujo.

Los cambios de fase como la ebullición, condensación, fusión y congelación, cuando ocurren, siempre conducen a modificaciones importantes del flujo y dan lugar a un flujo multifásico. Un papel importante en la determinación de la naturaleza del flujo se encuentra en la variación de otras propiedades como la viscosidad, la tensión superficial, etc.

Por otro lado, el parámetro de la velocidad de un flujo afecta sus propiedades de varias maneras. Es el caso, que, a velocidades suficientemente bajas, la inercia del fluido puede ignorarse y tenemos un flujo lento. Este régimen es importante en flujos que contienen partículas pequeñas (suspensiones), en flujos a través de medios porosos o en pasos estrechos (técnicas de recubrimiento, microdispositivos).

A medida que aumenta la velocidad, la inercia se vuelve importante y cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, es decir se dice que el flujo es laminar. Aumentos adicionales en la velocidad pueden conducir a la inestabilidad que eventualmente produce un tipo de flujo más aleatorio que se llama turbulento.

5.1.2. Descripción general

La Dinámica computacional de fluidos o CFD, nos permite resolver problemas de flujo de fluidos en la práctica de la ingeniería moderna, por medio de las ecuaciones matemáticas que representan las características físicas del movimiento de un fluido. Representa y analiza de forma aproximada con el fin de obtener su mayor entendimiento. Para optar por el uso de la misma, debemos analizar las ventajas y desventajas que se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Experimentación vs simulación.

Experimentación	Simulación en CFD
<ul style="list-style-type: none"> • Se analiza en un número de puntos limitados y a instantes de tiempo específicos. • Seleccionado para un modelo escalado de laboratorio. • Se realiza un solo experimento a la vez. • Costoso. • Secuencial. • Errores comunes: medición, distorsiones de flujo por las probetas. • Se realiza un solo experimento a la vez. • Lento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resolución en espacio y tiempo. • Para dominio actual de flujo. • Económico. • Rápido. • Paralelo. • Multipropósito. • Errores comunes: modelamiento, discretización, implementación. • Se virtualiza cualquier problema y condiciones de operación reales. • Se pueden realizar diversas simulaciones con diversidad de ambientes.

Fuente: Kuzmin.

5.1.3. Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional

Las ecuaciones generales de la Mecánica de Fluidos, son las responsables de gobernar el equilibrio y movimiento de los fluidos considerados incompresibles, así como su interacción con los contornos sólidos que conforman el dominio de estudio o volumen de control. (Monge, 2017).

5.1.3.1. Sistema o volumen de control

Para White (2004), en el análisis de los sistemas de fluidos, podemos seguir la trayectoria de una partícula fluida, sin embargo, nos concentraremos en el fluido para que sea el entorno de nuestro objeto y el cual deseamos conocer su interacción. Si deseamos conocer, por ejemplo: las cargas de deformación, la presión del fluido, la resistencia de una sonda espacial o las fuerzas de viento sobre una viga; esto requiere la aplicación sobre una región específica en las proximidades de nuestro objetivo. En otras palabras, lo que ocurre a las partículas fluidas del viento lejos de la viga es de muy poco interés para el proyectista de la viga, Es el punto de vista del usuario el que determina la necesidad del análisis de volumen de control.

Al analizar un volumen de control, acomodamos las leyes de un sistema para aplicarlas a una región específica que el sistema puede ocupar en un instante determinado, con independencia de que el sistema permanezca o no en esa región. Todo lo que se necesita saber es el campo fluido en esa región y a menudo basta con alguna simplificación, como las del flujo uniforme a la entrada o a la salida. Las ecuaciones de la mecánica de fluidos, tales como, la conservación de masa, cantidad de movimiento y ecuación de la energía, describen la interacción del volumen de control con sus alrededores.

La siguiente ecuación representa las propiedades del fluido dentro de un volumen de control:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \beta \rho \, dV + \int_{SC} \beta \rho (V \cdot n) \, dA$$

Ecuación 1-44

Definimos \mathbf{n} como el vector unitario norma hacia el exterior en cualquier punto de la superficie de control, entonces $\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{V}_n$ para flujo saliente y $\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = -\mathbf{V}_n$ para el flujo entrante. La magnitud \mathbf{B} o β puede ser cualquier propiedad vectorial o escalar del fluido.

5.2. Métodos numéricos

5.2.1. Método de discretización

La elección del método de discretización adecuado, es el siguiente paso una vez seleccionado el modelo matemático. Debemos contar con un método que nos lleve a aproximar las ecuaciones diferenciales a un sistema de ecuaciones algebraicas de las variables, discretas en el espacio y en el tiempo. Existen enfoques, pero los más importantes entre ellos son: el método de diferencias finitas (FD), de volúmenes finitos (FV), y de elementos finitos (FE). Nuestra modelación numérica emplea el método de los volúmenes finitos.

5.2.1.1. Método de volúmenes finitos

El punto de partida del método de volúmenes finitos es la descomposición del dominio en pequeños volúmenes de control donde las variables son almacenadas en los nodos. Usualmente, los volúmenes de control y los nodos son definidos por una malla. Los nodos, donde se guardan las variables a resolver, se ubican en los vértices de esta malla o en los centros de los volúmenes y es la referencia con la que se cuenta para aproximar la solución en el resto del dominio. Se pueden usar cómodamente en todo tipo de mallas, tanto estructuradas como no estructuradas. Entre sus desventajas está la dificultad de obtener esquemas de alto orden, sobre todo en 3D, debido a que requieren tres niveles de aproximación: interpolación, diferenciación e integración. Es el método utilizado por la mayoría de software CFD (Ansys - Fluent, STAR CCM+, OPENFOAM etc.)

5.2.2. Criterio para fin de convergencia

La finalización de una simulación, luego de haber obtenido un mallado adecuado y colocado las condiciones iniciales en la configuración, ocurre cuando ha cumplido con tres requisitos asignados por el programa, los parámetros evaluados son: los residuales, los imbalances y los puntos de monitoreo.

Los residuales son propios de la simulación y siempre existirán. Ansys CFX permite entre dos tipos la finalización de la simulación: el residuo máximo (MAX) y el residuo

promedio de todos los volúmenes de control (RMS: *Root Mean Square*). En una simulación estacionaria, el residuo MAX debe ser al menos 0.001 y el RMS en las variables debe ser al menos 0.0001. Mientras que en una simulación transitoria, los residuales se deben mantener por debajo del valor asignado al RMS. Los imbalances evalúan la conservación de masa, momentum y energía a lo largo de todo el dominio. El imbalance se obtiene de restar el flujo de entrada con el flujo de salida de la variable y luego dividirla entre el flujo máximo. En una simulación con convergencia perfecta, se tiene que el flujo de entrada es igual que el flujo de salida, siendo el imbalance perfecto de 0%. Un criterio de finalización para los imbalances es que se encuentren por debajo del 1%. Finalmente, se debe analizar la evolución de los puntos de monitoreo. El punto de monitoreo evaluado es una variable de interés para el usuario. Si la variable en estudio ha alcanzado un valor estable en el tiempo, puede concluirse que la simulación ha finalizado. (Villarroel, 2015).

5.2.3. Propiedades

5.2.3.1. Consistencia

Se dice que un esquema es consistente, cuando a medida que se refina la malla (Δx y Δt se hacen pequeños) el error de truncamiento local tiende a cero. ($\Delta t \rightarrow 0$ y $\Delta x_i \rightarrow 0$). A la diferencia existente entre la ecuación de discretización y la ecuación exacta se le conoce como error de truncamiento.

5.2.3.2. Estabilidad

La definición de estabilidad de un determinado esquema numérico nos explica que debe limitarse la propagación de los errores de redondeo que se cometen al tratar de operar con precisión los elementos finitos. Por ejemplo, un esquema numérico inestable amplifica estos errores de redondeo y da lugar a oscilaciones en la solución, de manera que una pequeña perturbación en los datos del esquema, causa grandes perturbaciones en la solución. Para todo Δx y Δt que es incondicionalmente estable, se asume que es un esquema numérico estable. Sin embargo, un esquema no tiene porqué ser siempre estable o inestable, ya que puede tener un carácter u otro dependiendo de las condiciones dadas a Δx y Δt .

5.2.3.3. Convergencia

La convergencia para un programador, permite asegurar que a medida que la discretización de la malla y la temporalidad sean más finas, la solución numérica obtenida se aproximará más a la solución exacta. El estudio de la convergencia de un determinado esquema numérico debe tener en cuenta tanto el error de truncamiento, que aparece como resultado de la discretización de la ecuación; como el error de redondeo, debido a que los cálculos se realizan en un ordenador con precisión finita. La convergencia es usualmente comprobada utilizando experimentos numéricos. Si el método es estable y todas las aproximaciones utilizadas en el proceso de discretización son consistentes, usualmente se encuentra que la solución converge.

5.3. Modelos numéricos

Según Atoche & Vásquez (2001), existen muchos problemas de ingeniería hidráulica que guardan relación con el movimiento del agua en diferentes flujos, estos brindan un gran aporte a la ingeniería civil para el proceso constructivo de diversas estructuras hidráulicas como bocatomas, desarenadores, canales, entre otros.

Debido al alto grado de dificultad al momento de analizar la dinámica del movimiento del agua, se ha recurrido durante mucho tiempo a la construcción a escala de modelos físicos que permitan un mejor estudio de las estructuras hidráulicas. Sin embargo, el gran incremento en la capacidad de cálculo de las computadoras que ha aparecido en los últimos años, ha permitido un avance importante en el ámbito de los modelos numéricos de simulación de flujos.

5.3.1. Características

Los modelos numéricos nos permiten resolver ecuaciones matemáticas que describen un determinado fenómeno; su uso aparece cuando es necesario hacer uso de expresiones matemáticas muy complejas para describir los flujos presentes en las estructuras hidráulicas, ya que dichas expresiones a menudo requieren de métodos de solución refinados, los cuales solamente podían resolverse en tiempo relativamente grandes y con ordenadores de gran capacidad. La disponibilidad para hacer cálculos complejos con los modelos numéricos únicamente se haya al alcance en centros de investigación. Dada esa circunstancia, durante mucho tiempo se hacían modelos físicos a escala, siendo el único recurso disponible en el estudio de problemas de flujos. Sin embargo, el gran desarrollo tecnológico ha aumentado el acceso a una gran cantidad de usuarios a los modelos numéricos. Con ello, permite que tanto el modelo físico como el modelo numérico, puedan ser utilizados como complemento del otro y

así lograr un mejor aprovechamiento, pensando a futuro en la implementación de modelos combinados físico-numéricos cuyos resultados optimicen la relación entre el beneficio y el costo, además del tiempo de investigación.

5.3.2. Tipos de modelos numéricos

Los modelos numéricos se pueden clasificar según las necesidades del diseñador, a continuación, se presentarán algunos de ellos.

5.3.2.1. Dimensionalidad

Según el criterio de dimensionalidad, existen los modelos 1D, 2D o 3D los cuales representan la variación de las dimensiones de un cuerpo o una estructura hidráulica en estudio. La Figura 24 nos muestra los tres tipos modelos dimensionales.

Los modelos unidimensionales (1D) como por ejemplo el estudio de canales o de ríos de gran extensión, son aplicados en este tipo de cuerpos donde una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos, es decir la longitud a lo largo de un canal o de un río. Se introducen la información hidráulica sobre cada sección transversal y así cada una se trabajará con un único valor de tirante y de velocidad en promedio. Por esta razón, no se consideran las variaciones de velocidad tanto de modo horizontal como vertical. También tener en cuenta que el valor de velocidad ingresado es perpendicular a la sección transversal analizada. Estas condiciones limitan al modelo, por lo que solamente son empleados en tramos de ríos y canales muy largos, cuyas dimensiones son mayores a 20 veces el ancho y donde se busca determinar el nivel máximo de agua.

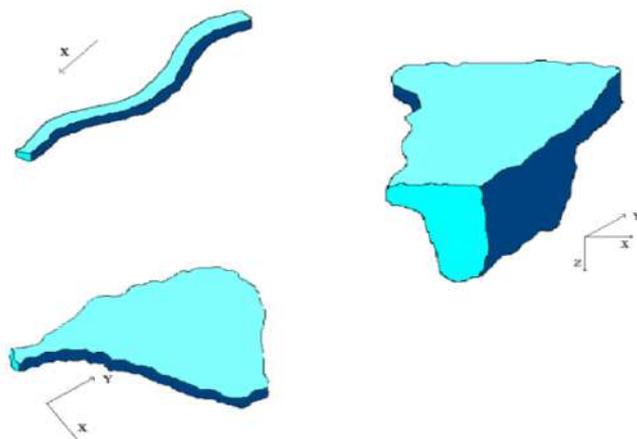


Figura 24. Esquema de modelos hidráulicos unidimensional, bidimensional y tridimensional.

Fuente: Vásquez Ojeda (2003).

En los modelos bidimensionales (2D) los datos son ingresados en un plano horizontal. Se consideran como valores puntuales a la variable velocidad o cualquier otra variable de interés en un plano vertical. Estos modelos suelen ser utilizados en cuerpos de agua de gran extensión y poca variación de profundidad, como lagos o estuarios; a este tipo de modelos se les conoce como aguas someras o poco profundas. No son tratados en casos donde exista una variación vertical relativamente considerable como un vertedero; sin embargo, se pueden utilizar en este tipo de modelación a través del uso de expresiones empíricas u otras simplificaciones.

Finalmente, los modelos tridimensionales (3D) muestran el estado más avanzado del flujo en una estructura hidráulica, pues para cualquier caso práctico, permite realizar los cálculos competentes a las tres componentes espaciales de la velocidad. (Vásquez Ojeda, 2003).

5.3.2.2. Método de cálculo

Por definición de agua, este es un medio continuo constituido por un número casi infinito de partículas y para lograr un mejor análisis del fluido se recurre a la división del mismo en pequeños elementos de tamaño finito, estos son más prácticos y las computadoras son capaces de manejarlas. En casos de un flujo de una sola dimensión, el proceso de discretización se realiza por niveles en las secciones transversales y el método de cálculo se da por etapas. Si hubiera problemas de convergencia en alguna de las secciones, este proceso tiene una solución el cual es asumir un valor de tirante crítico y continuar con el proceso. Así, se puede afirmar que en este método hay programas más rápidos, y numéricamente confiables. En cambio, tanto en 2D y 3D, se requiere resolver una serie de ecuaciones diferenciales y una discretización más fina mediante el uso de mallas.

Los principales métodos de cálculo son el método de diferencias finitas (MDF), método de elementos finitos (MEF) y de volúmenes finitos (MVF); todos estos métodos utilizan un conjunto finito de puntos discretos presentes en un dominio continuo para dar solución a las ecuaciones de dicho dominio. Cuando se encuentran los valores buscados en los puntos discretos, se puede hacer uso de la interpolación para hallar la solución en cualquier otro punto.

En los modelos numéricos presentan gran facilidad para manejar datos de condiciones iniciales y de frontera complejas con bastante detalle y precisión, en los cuales no existen soluciones analíticas. Sin embargo, llegar a una solución simultánea de todos los nodos del dominio en la mayoría de estos métodos, aumenta la carga computacional por lo que el proceso se vuelve más lento.

Dependiendo del tipo de caso a evaluar, los tres métodos mencionados anteriormente son buenos. Por lo general, para geometrías simples el MDF es muy útil pues es muy rápido y simple; sin embargo, para geometrías complejas, exigen a su vez mallas complejas que se modelan mejor con el MEF o MVF. (Vásquez Ojeda, 2003).

5.3.2.3. Regímenes de flujo

Según el régimen de flujo, el flujo subcrítico (Número de Froude < 1) son más sencillos y cualquier programa tiene la capacidad para modelarlo con facilidad; caso contrario el flujo supercrítico (Número de Froude > 1) muestra una mayor complejidad para muchos modelos numéricos a causa de la formación de ondas de choque o saltos hidráulicos en los cambios a régimen subcrítico.

Este problema de formación de resaltos hidráulicos solamente se produce en flujos supercríticos de tramos muy largos para canales artificiales revestidos, pues en el caso de los ríos, ocurre un proceso de erosión en el fondo que estabiliza dicha turbulencia a través de un escalonamiento sucesivo conformado por pozas y rápidas con una mezcla de flujos subcrítico y supercrítico alternados, que los programas numéricos difícilmente pueden modelar con precisión. (Vásquez Ojeda, 2003).

5.3.2.4. Variación en el tiempo

La variación de las variables del flujo en el tiempo, permiten a los flujos clasificarlos en permanentes y transitorios. A los flujos permanentes les corresponde que todas las magnitudes hidráulicas de interés sean constantes en el tiempo; todos los modelos numéricos presentan esta opción por defecto.

Para flujos impermanente o transitorio algunas magnitudes como la velocidad o el tirante pueden variar en el tiempo, como en el caso del tránsito de una onda de avenidas a través de un río. Existen algunos programas que tienen la capacidad de modelar estos regímenes impermanente y son útiles cuando se tiene interés en el estudio de transporte de sedimentos, procesos de erosión y sedimentación. Por otro lado, los de flujos impermanente muy bruscos originados por roturas de presa, estos necesitan de tratamientos especiales. (Vásquez Ojeda, 2003).

5.4. Turbulencia

La turbulencia es un fenómeno de flujo oscilante, turbio y supuestamente aleatoria. En la ingeniería todos los flujos son considerados turbulentos; originados por la presencia de irregularidades, las cuales se incrementan y se eliminan cíclicamente formando vórtices. El comportamiento del flujo en un fluido puede ser determinado gracias al número de Reynolds. Se sabe que el número de Reynolds es una representación de la magnitud relativa de los esfuerzos inerciales con respecto a los efectos viscosos. Por lo tanto, un flujo en el cual predominan los esfuerzos viscosos es considerado laminar, y la pérdida de ésta es conocida como turbulencia. Por medio de un análisis cuidadoso en las soluciones de la ecuación de Navier-Stokes, muestra que la turbulencia es un fenómeno complejo con grandes y pequeños vórtices a nivel escalar y no se cumple a nivel molecular.

5.4.1. Ecuaciones de Navier-Stokes

Son un conjunto de ecuaciones de derivadas parciales no lineales utilizadas para describir el movimiento de un fluido. Estas rigen el comportamiento de cualquier fenómeno que presente fluidos del tipo newtoniano, las cuales han surgido de la aplicación de la segunda ley de Newton para el movimiento de fluidos. En un fluido Newtoniano los esfuerzos viscosos son proporcionales a la deformación.

La ley de Newton de la viscosidad para fluidos no compresibles en tres dimensiones incluye solo una constante de proporción: la viscosidad dinámica μ , que relaciona esfuerzos con deformaciones lineales y la segunda viscosidad λ , para relacionar tensiones con la deformación volumétrica. (Malalasekera & Versteeg, 1995). Las nueve componentes de fuerzas viscosas son:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{du}{dx} \quad \text{Ecuación 1-45}$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{dv}{dy} \quad \text{Ecuación 1-46}$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{dw}{dz} \quad \text{Ecuación 1-47}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) \quad \text{Ecuación 1-48}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx} \right) \quad \text{Ecuación 1-49}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy} \right) \quad \text{Ecuación 1-50}$$

Ahora sustituyendo estos esfuerzos cortantes en la ecuación final de la conservación de la cantidad de movimiento (ver acápite 5.7.2.) origina las denominadas ecuaciones de Navier Stokes. Desarrollando la expresión sería así:

$$\frac{d\tau_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} = \mu \left(\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} \right) \quad \text{Ecuación 1-51}$$

$$\frac{d\tau_{yy}}{dx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \frac{d\tau_{yz}}{dz} = \mu \left(\frac{d^2v}{dx^2} + \frac{d^2v}{dy^2} + \frac{d^2v}{dz^2} \right) \quad \text{Ecuación 1-52}$$

$$\frac{d\tau_{zz}}{dx} + \frac{d\tau_{zx}}{dy} + \frac{d\tau_{zy}}{dz} = \mu \left(\frac{d^2w}{dx^2} + \frac{d^2w}{dy^2} + \frac{d^2w}{dz^2} \right) \quad \text{Ecuación 1-53}$$

Por ejemplo, en la componente "X", desarrollando la expresión quedaría:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho u}{dt} + u \frac{d\rho u}{dx} + v \frac{d\rho u}{dy} + w \frac{d\rho u}{dz} \\ = -\frac{1}{\rho} * \frac{d\rho}{dx} + \mu \left(\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} \right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 1-54}$$

Consideramos el parámetro fuerza \vec{f} como la gravedad, entonces las ecuaciones de Navier-Stokes pueden representarse en la forma más famosa para el desarrollo por el método de volúmenes finitos:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{d\rho}{dx} + \mu \cdot \Delta \cdot u + \rho g \quad \text{Ecuación 1-55}$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{d\rho}{dy} + \mu \cdot \Delta \cdot v + \rho g$$

Ecuación 1-56

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{d\rho}{dw} + \mu \cdot \Delta \cdot w + \rho g$$

Ecuación 1-57

5.4.2. Descripción física de un fenómeno

Las ecuaciones de Navier-Stokes nos facilitan el entendimiento del movimiento de un fluido y la modelación de sus parámetros, sin embargo, la no linealidad inherente de las ecuaciones imposibilita una descripción analítica completa del proceso de transición real si es que la comparamos con las teorías lineales, las cuales si pueden lograr un cierto grado de éxito en la predicción.

Arteaga (2017), explica que según Roberto Zenit, el flujo laminar o turbulento como se ven en la Figura 25, puede describirse físicamente por las siguientes propiedades:

- Naturaleza fluctuante: Tanto la presión como la velocidad fluctúan alrededor de un valor promedio. Dichas fluctuaciones son de naturaleza tridimensional.
- Aparición de remolinos: Las capas de fluido están acomodadas en estructuras coherentes llamadas remolinos o vórtices. Los vórtices tienen una amplia distribución de tamaños, que van desde la dimensión que atraviesa el flujo hasta el tamaño en la cual se disipa el movimiento por acción de la viscosidad.
- Mantenimiento autónomo: Un flujo turbulento puede mantenerse turbulento a sí mismo. Los remolinos grandes generan remolinos pequeños.
- Disipación: Puesto que el flujo es autónomo, la ruptura sucesiva de vórtices a escalas más pequeñas llevará eventualmente a la generación de vórtices del tamaño de la escala de Kolmogorov. Una vez alcanzado este tamaño, el movimiento se disipa por el efecto de la viscosidad. En otras palabras, un flujo turbulento disminuirá progresivamente a menos que exista un mecanismo de entrada de energía que lo mantenga constante en el tiempo.

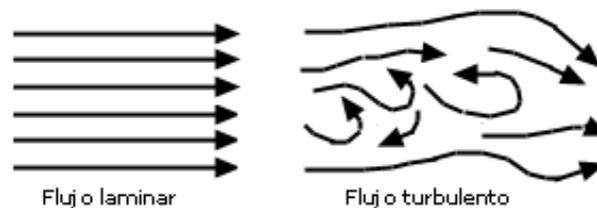


Figura 25. Representación del flujo laminar y turbulento.

Fuente: Sánchez Folch, 2016.

5.4.3. Modelos de turbulencia

Bayona, Londoño & Nieto (2015), explican que para lograr la simulación en dinámica de fluidos computacional (CFD), se requieren en el lenguaje de programación del software ecuaciones que rigen el comportamiento de cada uno de los parámetros de un fluido. Uno de los parámetros más característicos de los fluidos es la turbulencia, Wilcox (1994) expresa que las teorías matemáticas alrededor del modelado de fluidos fueron desarrolladas profundamente, pero aún no se había adquirido un modelado preciso para los fenómenos turbulentos debido a la complejidad del fenómeno.

La turbulencia es tridimensional, dependiente del tiempo. Debido a que estas fluctuaciones pueden ser demasiado pequeñas y de alta frecuencia, modelarlas por métodos numéricos directamente representa un costo computacional muy alto. Para reducir la carga de procesamiento se diseñaron modelos de ecuaciones, los cuales eliminan las escalas más pequeñas mediante un promedio basado en tiempo o en un conjunto de variables, esto da resultado a obtener ecuaciones menos exigentes para el proceso, pero con mayor número de variables para las cuales se deben formular con más ecuaciones y encontrar el valor de las incógnitas. (ANSYS Inc, 2013).

Por ejemplo, en uno de los modelos llamado RANS, uno de los parámetros importantes que tienen en cuenta es la disipación de la turbulencia, como tasa de disipación de la turbulencia ε o su tasa específica de disipación ω , dan el valor en qué medida y en qué tiempo se da esta disipación.

El software de dinámica de fluidos computacional, Ansys, ofrece las siguientes alternativas de análisis respecto a modelos de turbulencia:

- Spallart – Allmaras
- $K - \varepsilon$ (En sus variables RNG, Realizable y Standard)
- $K - \omega$ (En sus variables Standard, y SST)
- Transition SST
- $K - k_l - \omega$
- Reynolds Stress
- SAS
- DES

Los modelos de turbulencia suelen encajar en tres categorías principales según Davoudabadi (2012): DNS, SRS y RANS.

5.4.3.1. DNS (Direct Numerical Simulation)

Por sus siglas en inglés *Direct Numerical Simulation*, según Menter (2011), es el modelo numérico de resolución completo de las ecuaciones de Navier – Stokes de todas las características de la turbulencia en cualquier espacio y tiempo. Además, el modelo DNS debe ser aplicado en geometrías muy simples y a bajos números de Reynolds, ya que para aplicaciones de ingeniería no podrán ser obtenidas soluciones numéricas de turbulencia en escalas con números relativos a Re^3 y números de Reynolds entre 104 y 109.

Se puede hacer una idea de los recursos que consume el método numérico relativo a los que consumiría un modelo RANS con base en Menter (2011): “El orden en que el uso de CPU se reduce en los modelos RANS relativo a DNS para aplicaciones técnicas es astronómico (alcanzando una reducción de 1010 y más); estos modelos, entonces, no son simples modelos que alteran y redefinen las ecuaciones resueltas.”

5.4.3.2. SRS (Scale Resolving Simulation)

Menter (2011), nos explica que es un modelo mediante el cual una parte de todo el conjunto de la turbulencia es resuelto mediante métodos numéricos, y la otra parte es modelada por medio de RANS. Se ha demostrado que los modelos RANS presentan grandes ventajas en simular flujos que se encuentran unidos a las paredes, mientras que los fluidos libres o combinados sin esfuerzos cortantes son una de sus desventajas principales. Dentro de los modelos SRS encontramos los modelos LES, DES y SAS.

- El modelo LES (*Large Eddy Simulation*) por sus siglas en inglés, es un modelo el cual no ha sido muy aceptado por la comunidad que se inclina por los problemas de ingeniería y se ha mantenido como herramienta de investigación de acuerdo a Menter (2011). El modelo LES igualmente requiere mallas muy finas, mayor número de iteraciones por tiempo y su procesamiento comparado con algún modelo RANS es muy superior.

A manera de ejemplo encontramos un comparativo expuesto por Davoudabadi (2012), entre el costo computacional de un proceso realizado mediante LES y el mismo realizado bajo un modelo RANS. La información expuesta en la Tabla 24 corresponde a los resultados de los recursos utilizados en una simulación de un fluido a través de un canal con un Re igual a 114,000.

Tabla 24. Comparación entre los modelos RANS y LES.

Modelo	Celda	Cálculo	Duración
LES	1200000	Transiente	Días
RANS	140	Estable	Minutos

Fuente: Bayona, Londoño, & Nieto, 2015.

Las principales causas para inclinarse por el modelo LES es que puede ofrecer datos mucho más exactos que los modelos RANS y además puede dar resultados de información adicional tales como cavitación, fenómenos acústicos, interacción estructural con la respuesta en frecuencia y resultados aerodinámicos de alta precisión. (Davoudabadi, 2012).

- El modelo DES es una alternativa para las simulaciones SRS. Este modelo está bajo la influencia de la resolución de la malla y contiene una formulación híbrida la cual permite que el software escoja entre un modelo SRS y un modelo RANS. Este modelo ha ganado peso en la comunidad debido a su capacidad para implementarse en aplicaciones de ingeniería con relativa facilidad como manifiesta Menter (2011).

ANSYS Inc (2013), los modelos DES fueron específicamente diseñados para lograr obtener resultados en simulaciones con alto número de Reynolds en flujos cercanos a paredes, y además este modelo a diferencia de LES puede seleccionar el modelo RANS adecuado en cada etapa del flujo. También argumenta que, a pesar de los beneficios del modelo, el costo computacional sigue siendo demasiado alto.

(ANSYS Inc, 2013): “Los costos computacionales, usando modelos DES, son menores que los costos computacionales de LES, pero mayores que los de RANS.”

- El modelo SAS (Scale - Adaptive Simulation) es un modelo en el cual la densidad de la malla no afecta la formulación RANS. Además, le permite al modelo adaptarse de acuerdo a las condiciones de viscosidad Eddy. El modelo es capaz de reajustarse y proveer una formulación LES en secciones permitidas, pero así mismo en secciones donde las condiciones son propias de RANS, el modelo se mantiene bajo esas características.

5.4.3.3. RANS (Reynolds – Averaged Navier Stokes)

Los modelos derivados de los modelos RANS consisten en el principio establecido por Reynolds en 1985, en el cual todas las cantidades son expresadas como la suma de las partes individuales. Esta formulación permite crear un promedio de las variables con respecto al tiempo. (Wilcox, Turbulence Modeling for CFD, 1993). Este proceso de promediar las

ecuaciones se deriva en ventajas y desventajas con respecto al análisis de los fluidos, una de las primeras desventajas que salto a la vista es que en este proceso se eliminan los cambios propios de la turbulencia. Por otro lado, la gran ventaja que adquieren los modelos bajo esta formulación, es la facilidad para realizar gran variedad de procesos en cualquier computador hoy en día. (Menter, 2011).

La ecuación de Navier – Stokes promediada adiciona incógnitas desconocidas, mayores al número de ecuaciones que se tiene, por lo tanto, es trabajo de los modelos de turbulencia RANS completar estas ecuaciones para modelar totalmente las características turbulentas de un fluido.

Se puede establecer la importancia que han ganado estos modelos en la industria, convirtiéndose en el estándar para simulaciones de aplicaciones de ingeniería en muchos campos. Según Menter (2011): “(...) si se selecciona una propiedad aplicada, los ingenieros ofrecen un balance altamente atractivo entre recursos computacionales y la precisión requerida para la mayoría de aplicaciones industriales.” Los modelos RANS son los que se describen a continuación:

- Spallart-Allmaras es un modelo de turbulencia de una ecuación, principalmente diseñado para análisis de perfiles aerodinámicos en flujo subsónico. Es acertado en fluidos cercanos a las paredes y ha sido probado como un buen modelo para capas límite con gradientes de presión adversos. (ANSYS Inc, 2013).

En casos de turbulencia isotrópica, la disminución en la viscosidad turbulenta representa una sobre predicción de flujo turbulento, este modelo no tiene en cuenta en sus ecuaciones la energía cinética que produce la turbulencia, por lo cual, según el ambiente de simulación, las zonas de flujo turbulento pueden presentar un mayor margen de error. Por otro lado, en cuestión de mallas este modelo resulta tener una buena aproximación cuando los resultados esperados acerca de fluidos turbulentos y sus afectaciones no necesitan ser de gran precisión, es por esto que una malla no tan fina se puede usar con aceptables resultados bajo este modelo, debido a su tratamiento de pared cercana. (Fluent Inc, 2003).

- RNG $k-\epsilon$, de acuerdo a ANSYS Inc. (2013), las ecuaciones de $k-\epsilon$ en este modelo han sido derivadas mediante un método estadístico riguroso de las ecuaciones de Navier – Stokes. Estas ecuaciones son similares a las de su modelo inicial. Además, analiza el efecto de ondas fluctuantes en la turbulencia. El modelo cuenta con ecuaciones adicionales las cuales se desarrollan para darle características al modelo, superiores a las de su modelo estándar, se tiene

la ecuación de modificación del efecto de ondas fluctuantes en la turbulencia y ecuación del término Re . Debido a las características de aumento de ε reduciendo k y además la efectividad viscosa el modelo resulta ser más certero en la evaluación de flujos deformados y de líneas de corriente curvadas (ANSYS Inc., 2013).

- Realizable k - ε , las principales diferencias entre este modelo y su modelo original radican en que, en primer lugar, este modelo contiene una formulación distinta para analizar la viscosidad turbulenta, y en segundo lugar, para hallar la disipación de ε , el modelo ha formulado una derivación de la raíz de la fluctuación en la vorticidad. (ANSYS Inc, 2013). Al igual que en el modelo standard la ecuación que está regida bajo k , es igual en este modelo, sin embargo, la ecuación de ε es diferente y no tiene en cuenta la producción de k (ANSYS Inc, 2013). Dentro de las ventajas de este modelo se tiene que, es especialmente preciso en flujos planos, capas límite bajo gradientes de presión extremos o separación de la misma, rotación, recirculación, y una alta curvatura de las líneas de corriente.
- k - ω , en este modelo ANSYS Inc. (2013), expone que es usado para predecir desarrollo de la capa límite y entre sus ventajas este modelo puede predecir correctamente los fenómenos de transición entre flujo laminar y turbulento. Es considerado como un modelo de tres ecuaciones, que incluye ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta, la energía cinética laminar y la tasa específica de disipación de la turbulencia.
- RSM ó Reynolds Stress Model es el modelo más completo que puede ofrecer las formulaciones RANS, este modelo deja a un lado la viscosidad turbulenta isotrópica y cierra las ecuaciones promediadas de Navier – Stokes por medio de los esfuerzos de Reynolds, además de una ecuación para la tasa de disipación. ANSYS Inc (2013), establece que el modelo RSM puede ejecutar de manera más rigurosa las simulaciones de flujos curvos, rotación y con grandes cambios en la tasa de deformación. Es recomendable para la simulación de fluidos complejos.

Por otro lado, dentro de las desventajas de este modelo, ANSYS Inc. (2013), expresa que el modelado de disipación de calor y el de altos gradientes de presión, representan un mayor gasto en la capacidad computacional con respecto a modelos más simples de dos ecuaciones. Este modelo se puede limitar a flujos circulares, fluidos altamente oscilantes, flujos en cámaras de combustión y esfuerzos inducidos en ductos. (Fluent Inc, 2003).

5.4.3.4. Standard k-ε

Standard k-ε, este modelo es de dos ecuaciones que permite tener solución independiente de las escalas de longitud y la velocidad turbulenta. (ANSYS Inc, 2013). Sus ecuaciones de transporte permiten obtener los términos k y ε los cuales se refieren a la energía cinética y a la tasa de disipación de la turbulencia. El modelo k-ε se presenta como una solución adecuada para distintas aplicaciones de ingeniería y ha sido ampliamente usado. Dentro de las ventajas de este modelo encontramos que es un modelo simple de implementar, los cálculos convergen relativamente fácil y se dan resultados coherentes para distintos regímenes de fluidos y tipos de fluidos. (Fluent Inc, 2003). Este modelo resulta no ser muy preciso para flujos en rotación, con gran separación, flujos simétricos y fluidos totalmente desarrollados en tubos no circulares.

Noblecilla Palomino (2019), presenta en su investigación, a partir de las ecuaciones de transporte, el siguiente modelo Standard k-ε:

$$[k] \dots \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + (P - D)$$

Ecuación 1-58

$$[\varepsilon] \dots \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w \varepsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P - C_2 D)$$

Ecuación 1-59

$$P = 2\mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu_T \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} \rho \mu_T k \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Ecuación 1-60

Donde:

$$D = \rho$$

$$k = \frac{2}{3} \mu_i'' \mu_i'', \text{ con } i = 1, 2, 3$$

$$\varepsilon = \mu_T \overline{\left(\frac{\partial \mu_i''}{\partial y_1}\right)} \overline{\left(\frac{\partial \mu_i''}{\partial y_1}\right)}, \text{ con } i, j = 1, 2, 3.$$

$$\mu_T = \frac{c_u \rho k^2}{\varepsilon}$$

$C_u, C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ = Constante del modelo estándar Launder y Spalding.

$$C_u = 0.09 \quad C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\varepsilon = 1.30$$

K = es la energía cinética.

ε = es la tasa de disipación de la energía cinética.

μ_T = viscosidad local de turbulencia.

P y D = términos de producción y destrucción, respectivamente.

σ y C = constantes ajustables, según datos experimentales propuestos por Launder y Spalding (1974).

Este modelo fue aplicado por Noblecilla Palomino (2019), para modelar la orientación de una bifurcación en el tramo del río Piura y así garantizar su aportación a los campos de velocidad para que representarán el comportamiento del flujo.

5.4.3.5. Standard k- ω

Standard k- ω resulta ser un modelo un poco más simplificado que el k- ε en términos de la ecuación de k. Se establece una ecuación de transporte para ω y se incluyen modificaciones para análisis en 59 bajo número Reynolds, efectos de compresibilidad y flujo cortante, aplicable a los flujos delimitados por la pared. En este modelo encontramos la variable ω la cual representa la tasa específica de disipación de la turbulencia. (ANSYS Inc, 2013). El modelo k- ω desarrollado por Wilcox (2006), se representa de la siguiente forma:

$$[k] \dots \frac{2}{3} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} \quad \text{Ecuación 1-61}$$

$$= P - \beta * \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$[\omega] \dots \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} \quad \text{Ecuación 1-62}$$

$$= \frac{\gamma\omega}{k} P - \beta * \rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho\sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

Donde:

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$\tau_{ij} = \mu_T \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\mu_T = \frac{\rho k}{\hat{\omega}}$$

$$\hat{\omega} = \max \left[\omega, C_{lim} \sqrt{\frac{2S_{ij}S_{ij}}{\beta^*}} \right]$$

$$\bar{S}_{ij} = S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

Las constantes y funciones auxiliares son:

$$\beta^* = 0.09 \quad \beta = \beta_o f_\beta \quad \gamma = \frac{13}{25} \quad \sigma_k = 0.60 \quad \sigma_w = 0.50 \quad \beta_o = 0.0708 \quad C_{lim} = \frac{7}{8}$$

5.4.3.6. SST

SST llamado también *Shear Stress Transport*, fue diseñado para sobreponerse a las deficiencias de los otros modelos de dos ecuaciones. Es un modelo que resulta tener características combinadas de los modelos k-ε y k-ω para diferentes partes del flujo, asegurando que las ecuaciones del modelo se comporten apropiadamente tanto en la zona de la pared cercana como en la del campo lejano. (Fluent Inc, 2003). En el modelo k-ε, el término k representa la energía cinética de turbulencia el término ε representa la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta dentro de flujo y en el modelo k-ω, el término ω representa la relación entre la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta y la energía cinética de turbulencia.

De acuerdo a Menter (2011), el modelo SST tuvo una buena aceptación desde su implementación, para análisis aerodinámicos y de dinámica de fluidos en general. También comenta que las ecuaciones con el término ω encajan muy bien en transiciones de flujo laminar a flujo turbulento.

El modelo SST ha sido seleccionado y aplicado en la presente investigación luego de evaluar sus ventajas sobre la estructura y debido a su gran eficacia para la obtención de resultados. Cabe mencionar además el uso del modelo k- ϵ , sobre la investigación de Ruiz Venegas (2017), logró representar el comportamiento del flujo del desarenador San Gabán II. Sus resultados utilizando velocidades del modelo físico se asemejaron al modelo hidráulico. Además, representó las condiciones hidráulicas y sedimentológicas del desarenador San Gabán II comparando el cálculo de eficiencia de los valores teóricos del modelo físico con los resultados del modelo K-e.

Sin embargo, nuestra estructura en estudio presenta distinta funcionalidad y geometría, con diferentes pendientes en los tramos que conforman el sifón, diferentes cotas en la entrada y en la salida, y transiciones entre el canal y el sifón cambiando el flujo laminar a flujo turbulento. Por ello, con presencia de recirculación o Reynolds muy altos, se vio necesario hacer uso del modelo de turbulencia SST; la simulación del fluido cercano a las paredes estaría representado por el modelo k- ω y la simulación del fluido alejado de las paredes representado con el modelo k- ϵ .

5.4.4. Ecuaciones Reynolds - Averaged Navier Stokes (RANS)

Arteaga Acuña (2017) explica que el sistema de ecuaciones RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) son ecuaciones promediadas durante el movimiento del flujo del fluido. El concepto que estas ecuaciones tienen es la descomposición de Reynolds, en la cual una cantidad instantánea se descompone en sus cantidades promediadas en el tiempo, una idea nacida del mismo Osborne Reynolds.

Las ecuaciones RANS son apropiadas para describir flujos turbulentos. Estas se pueden utilizar con aproximaciones basadas en el conocimiento de las propiedades de la turbulencia del flujo, para dar en un tiempo promedio soluciones aproximadas a las ecuaciones de Navier-Stokes. Para un fluido de tipo newtoniano estacionario incompresible, estas ecuaciones pueden escribirse según la notación de Einstein de la siguiente manera:

$$\rho \bar{u}_j \frac{d\bar{u}_i}{dx_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{d}{dx_j} \left[-\bar{\rho} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{d\bar{u}_i}{dx_j} + \frac{d\bar{u}_j}{dx_i} \right) - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right]$$

Ecuación 1-63

El lado izquierdo de la ecuación representa el cambio medio de momentum del fluido debido a la inestabilidad en el flujo promedio y su convección. Este cambio se equilibra con la fuerza media del cuerpo, la tensión isotrópica debido a la presión de campo promedio, los esfuerzos viscosos y el esfuerzo aparente ($\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$) originados por la velocidad fluctuante de campo referido al esfuerzo de Reynolds. Para determinar su solución, este término no lineal requiere modelado adicional para cerrar la ecuación RANS, generando la creación de una variedad de modelos de turbulencia.

5.4.5. Número de Reynolds

Según Mott & Untener (2015), este número establece el estado de régimen en función del efecto viscoso. El estado laminar se mantiene ante pequeñas perturbaciones y ciertas condiciones, pero pequeños cambios pueden destruir la estructura inicial del flujo dando origen a la turbulencia. Representa la razón entre fuerzas inerciales y fuerzas viscosas actuantes en el flujo. La relación del número de Reynolds será:

$$Re = \frac{V * Rh}{\nu} = \frac{V * D}{\nu}$$

Ecuación 1-64

Donde:

V: velocidad media del flujo.

Rh: radio hidráulico. Relación entre área de la sección transversal del flujo y el perímetro mojado en la sección de un canal abierto. Usado en canales abiertos.

D: diámetro de la tubería.

ν : viscosidad cinemática del fluido.

Para fines prácticas los valores mostrados en la Tabla 25 y 26 se consideran en canales abiertos y secciones circulares cerradas como tuberías.

Tabla 25. Regímenes del flujo en canales abiertos.

Régimen laminar	Régimen en transición	Régimen turbulento
$Re < 500$	$500 < Re < 2000$	$2000 < Re$

Fuente: Mott & Untener, 2015.

Tabla 26. Regímenes del flujo en tuberías.

Régimen laminar	Región crítica	Régimen turbulento
$Re < 2000$	$2000 < Re < 4000$	$4000 < Re$

Fuente: Mott & Untener, 2015.

5.5. Modelo VOF

El modelo VOF es capaz de modelar dos o más fluidos inmiscibles permitiendo hallar un solo conjunto de ecuaciones de momento y siguiendo la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio. Las aplicaciones típicas incluyen la predicción de la disolución del chorro, el movimiento de grandes burbujas en un líquido, el movimiento del líquido después de una ruptura de la presa y el seguimiento constante o transitorio de cualquier interfaz líquido-gas. (Mogollón , 2018).

5.5.1. Limitaciones del modelo VOF

Las limitaciones del modelo VOF correspondiente al presente estudio son:

- No hay limitación en el uso de líquidos compresibles usando funciones definidas por el diseñador.
- Utilizar el solucionador que tiene como referencia la presión. El modelo VOF no está disponible con el solucionador referenciado en densidad.
- Es imposible modelar el flujo periódico en la dirección de la corriente principal (ya sea el caudal másico especificado o la caída de presión especificada) cuando se utiliza el modelo VOF.
- Todos los volúmenes de control deben llenarse con una sola fase de fluido o una combinación. El modelo VOF no consiente regiones vacías.
- La formulación implícita de tiempo de paso a paso de segundo orden no se puede utilizar con el esquema explícito VOF.

5.5.2. Modelo no homogéneo y homogéneo

Para Jaramillo (2017), Ansys CFX permite la simulación de múltiples corrientes de fluidos, burbujas, gotas, partículas sólidas y flujos de superficie libre, gracias a que posee una variedad de modelos multifase. Se pueden utilizar junto con varios modelos subsidiarios para modelar flujo disperso, mezclas de fluidos continuos, etc. Dependiendo de los tipos de fases, se disponen de diferentes modelos de transferencia de interface como un fluido continuo o disperso. Los modelos multifase disponibles en CFX serán:

- El modelo no homogéneo esta referenciado en el enfoque de Euler-Euler. Todas las fases son tratadas como continuas dentro de este enfoque. Estos modelos a menudo también se llaman modelos multi-fluidos, los cuales son apropiados para flujos separados donde ambas fases pueden ser descritas como un continuo. Sin embargo, el enfoque de Euler-Euler también puede usarse para modelar flujos dispersos cuando el movimiento general de las partículas es de interés en lugar de rastrear partículas individuales. Las ecuaciones de fase dispersa se promedian en cada celda computacional. Para poder describir una fase dispersa como continua, es necesario que la fracción volumétrica sea alta, siendo este enfoque adecuado para los flujos densos. Modelar fluidos con un amplio rango de concentración de partículas, permite capturar el efecto de la unión fluido-partícula y la interacción entre las partículas, pero se limita solo a sistemas con una distribución granulométrica pequeña. Un ejemplo del modelo Euler-Euler, tenemos: el flujo de burbujas, flujo de gotas, etc.
- El modelo homogéneo corresponde a un modelo Volumen of Fluid (VOF), la cual pertenece a la estructura del enfoque Euler-Euler donde todas las fases son tratadas como continuas, a excepción que no permite que las fases se mezclen. El método VOF utiliza una función de indicador de fase, a veces también es llamada función de color, para rastrear la interfaz entre dos o más fases. La función del indicador presenta valores como uno o cero cuando un volumen de control se llena completamente y un valor entre uno y cero si una interfaz está presente en el volumen de control. Como el enfoque del método VOF es rastrear la interfaz entre dos o más fases, es adecuado para flujos con interfaces nítidas, tales como: flujos en superficie libre, flujo estratificado, etc.

Si se denota q^{th} como la fracción de volumen en una celda, es posible definir tres condiciones que representen una celda.

- $\alpha_q = 0$: La celda está vacía (q^{th} del fluido).
- $\alpha_q = 1$: La celda está llena (q^{th} del fluido).

- $0 < \alpha_q < 1$: La celda contiene la interfaz entre el q^{th} fluido y uno o más fluidos.

Con base en el valor local de α_q las propiedades y variables son asignadas a cada volumen de control.

5.5.3. Ecuación de fracción de volumen

Dentro del dominio de un elemento, cada volumen de control estará asignado por las propiedades y variables apropiadas que estén en función del valor local de α_q . A través de la solución de una ecuación de continuidad, se logra el seguimiento de la interfaz entre las fases para una fracción de volumen. Para la fase q^{th} esta ecuación tiene la siguiente forma:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) \right] + \nabla (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp})$$

Donde:

m_{qp} = Transferencia de masa de la fase q a la fase p [kg/s]

m_{pq} = Transferencia de masa de la fase p a la fase q [kg/s]

La ecuación de fracción de volumen no se resolverá para la fase primaria. La fracción de volumen de la fase primaria se hallará según la siguiente restricción:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$$

5.6. Malla numérica

Consiste en la división del dominio en un conjunto de celdas, caras y nodos sobre los cuales se determinan las variables de flujo (como velocidad, presión y otras) aplicando la metodología de los volúmenes finitos. Al conjunto de celdas se denomina malla. Las mallas se clasifican en: malla estructurada, malla no estructural y malla híbrida.

5.6.1. Mallas estructuradas

Geoméricamente hablando vienen a ser mallas regulares, dado que se ligan a los elementos cuadriláteros (2D) y Hexaedros (3D) como se ve en la Figura 26. Las ventajas que presenta este tipo de mallado son la convergencia siendo ésta más accesible, presenta una

resolución buena en los resultados, optimización de espacio, es decir no se gasta tantos elementos para describir una región.

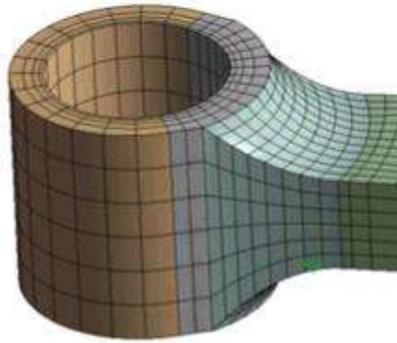


Figura 26. Ejemplo de una malla estructurada.
Fuente: Elaboración propia.

5.6.2. Mallas no-estructuradas

Ligados a los elementos triángulos (2D) y tetraedros (3D) como se ve en la Figura 27. Las principales ventajas que presenta este tipo de mallado son la presencia de curvaturas a detalle, se aprecia la forma del trazado; elementos muy versátiles, permitiendo analizar los fluidos sin problema, además reduce el tiempo que invertimos en mallar dado que describe fácilmente geometrías complejas. Las mallas no estructuradas usualmente trabajan con métodos de elementos finitos y cada vez se utilizan más en métodos de volúmenes finitos.

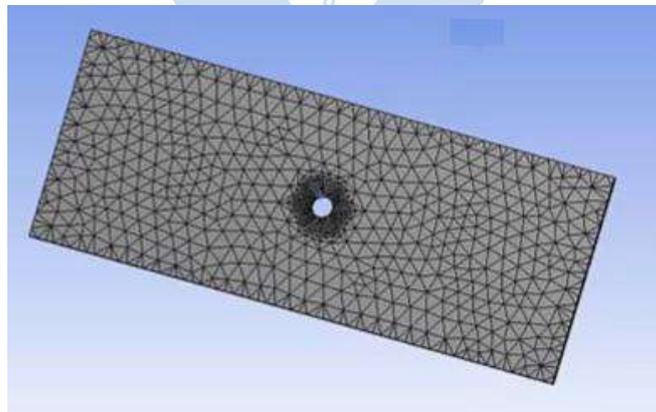


Figura 27. Ejemplo de una malla no estructurada.
Fuente: Elaboración propia.

5.6.3. Mallas híbridas

Es la combinación de los dos tipos de malla mencionados anteriormente como se ve en la Figura 28. Dependiendo de la complejidad de la geometría, una buena estrategia de mallado

sería utilizar un mallado híbrido, debido a que existen algunas zonas que no son de nuestro interés siendo ideal el uso de una mallado que nos ahorre el gasto computacional y el tiempo.

Este tipo de malla no es utilizado debido a que es difícil mantener la conservación en las fronteras de los bordes de los bloques.

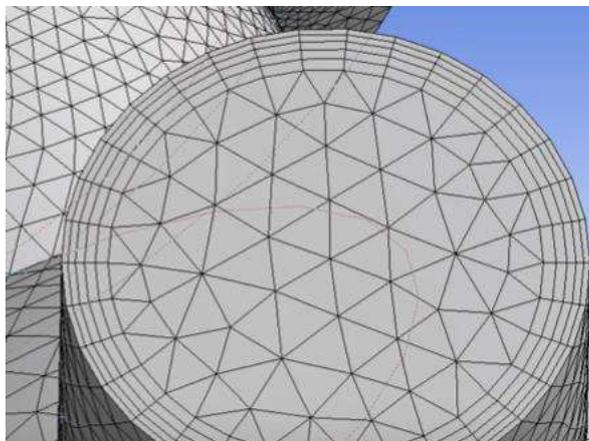


Figura 28. Ejemplo de una malla híbrida.
Fuente: Elaboración propia.

5.7. Ecuaciones de transporte

Según Bustamante Campoverde, 2018, denominamos mecánica de fluidos a la rama de la mecánica encargada del determinar el movimiento de los fluidos, como se originan las fuerzas y la interacción con su entorno. Esta a su vez, se encuentra relacionada con “el fenómeno de transporte de fluidos”, es decir, la capacidad que tienen los fluidos en movimiento de transportar materia y propiedades de un lugar a otro y el mecanismo por el cual la materia y sus propiedades se difunden y transmiten a través del medio fluido. Describe matemáticamente al movimiento del fluido por medio del parámetro de distribución de la velocidad y de dos magnitudes termodinámicas pertenecientes al fluido. Por ejemplo, contando con cinco magnitudes las cuales pueden ser tres componentes de la velocidad, la presión y la densidad, el estado del fluido queda completamente definido. Los fenómenos de transporte fundamentales que están asociados con el movimiento de un fluido son el transporte de masa, calor y momentum.

Cada uno de estos procesos está asociado con una ley física básica, como se observa en la Tabla 27:

Tabla 27. Leyes físicas de transporte.

Movimiento del fluido	Ley física
Masa	Conservación de masa
Calor	Conservación de la energía
Momentum	Ecuación del movimiento

Fuente: Bustamante Campoverde, 2018.

5.7.1. Transporte de masa

La ley de conservación de masa o ecuación de continuidad nos dice que esta se cumple con independencia del tipo de fluido o de las fuerzas que actúan sobre este, esto quiere decir que la masa del fluido no se genera ni se destruye en ningún punto.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad \text{Ecuación 1-65}$$

Dónde:

- ρ = Es la densidad del fluido.
- \vec{v} = La velocidad del fluido en un punto (x, y, z) en cualquier instante de tiempo.
- $\partial \rho / \partial t$ = Es la variación de masa por unidad de volumen en cualquier instante de tiempo.

La ecuación descrita también se la conoce como la Ecuación de Continuidad y se aplica para cualquier tipo de fluido y se usa en cualquier problema de mecánica de fluidos. (Bustamante Campoverde, 2018, pág. 31).

5.7.2. Transporte de momentum

La ecuación de movimiento o conservación de movimiento parte del cambio de momento dentro de un volumen “V”, rodeado por una superficie “S” a dicha integral se la conoce como flujo de momento.

Estos engloban los mecanismos de resistencia, esfuerzos de corte internos y de frontera, propulsión y fuerzas en cuerpos sumergidos. Está relacionada con la segunda Ley de Newton, la cual provee la relación fundamental entre la resultante de las fuerzas que actúan sobre una partícula y la variación temporal del cambio de momentum (producto de la masa de una partícula y su vector velocidad). (Bustamante Campoverde, 2018, págs. 31-33).

$$\int_S \rho \cdot v_i \cdot V \cdot dS \quad \text{Ecuación 1-66}$$

Al sumar todas las fuerzas que actúan sobre el volumen de control y superficie de control obtenemos.

$$\int_V \rho \cdot F_i \cdot dV + \int_S \sigma_{ij} \cdot dS_j \quad \text{Ecuación 1-67}$$

Dónde:

F_i = fuerzas del volumen que actúan sobre el fluido.

σ_{ij} = tensor de tensiones asociado a las fuerzas de superficie.

Si sumamos todas las ecuaciones obtenemos la ecuación de movimiento del flujo.

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_S \rho \cdot v_i \cdot dV \\ &= - \int_S \rho \cdot v_i \cdot V \cdot dS + \int_V \rho \cdot F_i \cdot dV + \int_S \sigma_{ij} \cdot dS_j \end{aligned} \quad \text{Ecuación 1-68}$$

Ahora si tenemos que:

$$\rho \cdot v_i \cdot V \cdot dS = \rho \cdot v_i v_j \cdot dS_j \quad \text{Ecuación 1-69}$$

Si reemplazamos lo anterior aplicamos el teorema de la divergencia se obtiene:

$$\int_V \left\{ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot v_i v_j) - \rho \cdot F_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) \right\} dV = 0 \quad \text{Ecuación 1-70}$$

Si nuestro volumen de control no es dependiente del tiempo podemos decir lo siguiente:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \cdot F_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) = 0 \quad \text{Ecuación 1-71}$$

Al aplicar la ecuación de conservación de masa al igualar términos obtenemos:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho \cdot F_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad \text{Ecuación 1-72}$$

De esta manera se obtiene la ecuación de movimiento en notación inicial:

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \rho \cdot F_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad \text{Ecuación 1-73}$$

Si expresamos la ecuación de movimiento en forma vectorial y usando el operador Laplaciano se obtiene:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \cdot \vec{F} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} \quad \text{Ecuación 1-74}$$

La derivada material de \vec{v} respecto al tiempo expresa la velocidad de la partícula respecto al tiempo de una partícula del fluido que se mueve en el espacio, esta manera de descripción se la conoce como Lagrangiano, el segundo tipo de descripción se la conoce como Euleriana. La derivada sustancial o material nos permite relacionar los enfoques anteriormente dichos, la siguiente ecuación define la derivada material de \vec{v} con respecto al tiempo expresa los cambios que sufre la partícula al moverse a través del fluido de la siguiente manera:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{d\vec{v}}{dt} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{v} \quad \text{Ecuación 1-75}$$

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \frac{d\vec{v}}{dt} + \rho (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{v} = -\vec{\nabla} \rho + \vec{\nabla} \sigma + \rho \vec{f} \quad \text{Ecuación 1-76}$$

5.7.3. Transporte de calor

El principio de conservación de la energía esta fuera del entorno de estudio de este trabajo, puesto que no afecta al problema que se presenta. Normalmente la energía de un fluido se define como la suma de la energía interna (que depende de la temperatura y fase del fluido), la energía cinética (que depende de la velocidad), y la energía potencial (que depende de la posición).

5.8. ANSYS CFX

5.8.1. Introducción

Se han utilizado las computadoras para resolver problemas de flujo de fluidos durante muchos años, desde mediados de la década de 1970 hasta principios de la década de 1980 comenzaron a entenderse las matemáticas complejas necesarias para generalizar los algoritmos, se requerían lo que entonces eran computadoras muy potentes, así como un conocimiento profundo de la dinámica de fluidos CFD y una gran cantidad de tiempo para configurar simulaciones. Los recientes avances en potencial informático han hecho que el proceso de crear un modelo CFD y analizar los resultados sea mucho menos laborioso, debido al desarrollo de gráficos potentes y manipulación interactiva en 3D de modelos, de esta manera, reduciendo el tiempo y en consecuencia el costo. Los solucionadores avanzados contienen algoritmos que permiten soluciones robustas del campo de flujo en un tiempo razonable.

Ansyes CFX, es un programa de análisis y simulación CFD (*Computational Fluids Dynamics*), que contiene programas de simulación para distintas especialidades de ingeniería como la hidráulica. Permite simular un fluido, es decir la experimentación de algún prototipo de estudio dentro de un computador, prediciendo de lo que puede ocurrir en una estructura real. Antes de ingresar directamente a la modelación, es necesario configurar el programa y elegir adecuadamente las que usaremos, esto lo lograremos mediante la plataforma *Ansyes workbench*, la cual se utiliza para crear los proyectos de análisis en diferentes disciplinas, compartiendo información de modelado y mallado. (Ansys Inc, 2015).

Ansyes CFX se basa en un algoritmo secuencial que debe seguirse para una adecuada ejecución, estas categorías se muestran en la Figura 29 y 30:

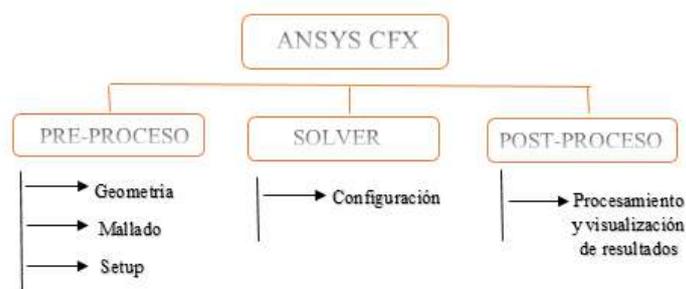


Figura 29. Módulo de Ansys CFX.

Fuente: Elaboración propia.

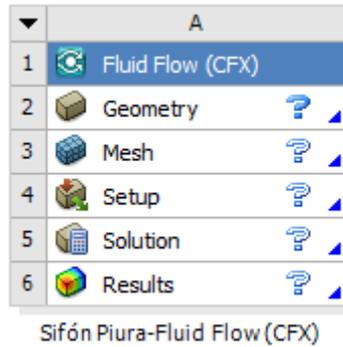


Figura 30. Esquema de nuestro proyecto en Ansys workbench.

Fuente: Sánchez Folch, 2016.

5.8.2. Pre proceso

Noblecilla Palomino (2019), explica detalladamente la estructura de modelación en Ansys CFX distribuido en 3 etapas: Pre-procesamiento, procesamiento y post proceso. Los procesos que se rigen para el análisis del sifón mediante Ansys se pueden ver en la Figura 31.

La primera etapa es el pre-proceso, el cual nos permite la creación de la geometría concreta, la discretización del mallado, la definición de los aspectos físicos del problema como la turbulencia, transferencia de materia y cantidad de movimiento; las condiciones iniciales de borde y las propiedades del fluido.

5.8.2.1. Geometría

Una de las características que posee Ansys CFX es permitir la importación de las geometrías en forma 2D o 3D de otros programas afines como el ya conocido: AUTOCAD.

Las opciones disponibles de Ansys CFX para la creación de geometrías son: *Ansys Desing Modeler* y *Ansys Discovery Space Claim*. En este trabajo de investigación se realizó el diseño de todo el dominio sobre la herramienta de diseño *Ansys Desing Modeler*.

El software proporciona una única fuente de geometría con una gama completa de herramientas de simulación de ingeniería, el cual nos ayudará a crear la geometría detallada para la simulación, minimizando las revisiones geométricas y simplificando el análisis. El trabajo se vuelve fácil, rápido y flexible.

5.8.2.2. Malla

Una malla es la representación discretizada del dominio de la geometría. Asigna celdas o regiones más pequeñas que contienen las ecuaciones que gobiernan el flujo. Como ya se ha explicado anteriormente, las mallas se clasifican de la siguiente manera: mallas estructuradas, mallas no-estructuradas y mallas híbridas.

Hablando geoméricamente existen diferentes formas de elementos que conforman una malla como cuadriláteros y triángulos (2D) y hexaedros y tetraedros (3D).

- **Calidad del mallado**

Los criterios para determinar la calidad de mallado, se presentan en la Tabla 28:

Tabla 28. Criterios de calidad del mallado.

Parámetro	Recomendaciones de calidad de malla
Element Quality	Calidad métrica compuesta que oscila entre 0 y 1, calificando el valor de 0 como pésimo y 1 como perfecto.
Aspecto Ratio	Calidad métrica que considera el valor de 0 como pésimo y 5 como un valor promedio aceptable.
Jacobian Ratio	Calidad métrica compuesta que oscila entre 0 y 1, calificando el valor de 0 como pésimo y 1 como excelente.
Skewness	Calidad métrica compuesta que oscila entre 0 y 1, calificando el valor de 0 como excelente y 1 como pésimo.
Orthogonal Quality	Calidad métrica compuesta que oscila entre 0 y 1, calificando el valor de 0 como pésimo y 1 como excelente.

Fuente: Ansys Inc, 2017.

- **Precisión de la solución**

El análisis de calidad de la malla garantiza que la solución sea más precisa. Para mejorar la calidad de la malla es posible que se deba refinar en determinadas áreas de la geometría donde los resultados de los gradientes se presenten como valores altos. Es decir que, si la malla

no está suficientemente refinada, la precisión de la solución es más limitada, de manera de que la precisión requerida va en función de la calidad de la malla.

5.8.2.3. Propiedades del fluido y condiciones de borde

Según Noblecilla Palomino (2019), para establecer las condiciones que tendrá el modelo numérico, ingresaremos a la celda Setup del módulo de Ansys CFX. Aquí se presentan las propiedades para los fluidos y las condiciones iniciales que el usuario necesita configurar antes del proceso de cálculo de las ecuaciones del movimiento de los fluidos. Es necesario tener un conocimiento teórico acerca de la descripción del fenómeno antes de ingresar los valores sobre las condiciones de borde establecidas en el dominio. Algunas propiedades de los fluidos que debemos tener en cuenta en el modelo son:

- El coeficiente de flotabilidad.
- El coeficiente de tensión superficial.
- Transferencia de calor sobre las paredes de la estructura.
- El modelo de turbulencia adecuado.
- El modelo de fluido multifásico.
- El fluido multifásico agua-aire.
- La densidad de flotabilidad.
- Las presiones que gobiernan el dominio.
- Coeficiente de rugosidad absoluta.

Cada valor ingresado que otorga una propiedad distinta en cada fluido empleado en este proyecto, se dará a conocer detalladamente en el capítulo 6.

Las condiciones de contorno son el punto de partida de una simulación, contienen valores preestablecidos de las variables que se solucionarán con las ecuaciones escogidas, y que se aplican en las fronteras del dominio computacional. Si un valor es ingresado de manera incorrecta se obtendrían resultados erróneos o es muy probable que el programa no calcule ninguna iteración. Ansys CFX nos da la facilidad de emitir mensajes de error cuando el ingreso de datos es incoherente. Los contornos de nuestro proyecto en estudio necesarios para el modelo a superficie libre son: entrada, salida, paredes y superficie libre; éstas serán explicadas en el capítulo 6.

- **Parámetros de modelación**

Proveer valores iniciales para la primera iteración u otorgar valores para la convergencia de la simulación, son también parte importante antes del proceso de solución. Es por ello, que para obtener valores coherentes que reflejen el comportamiento de una estructura real, se debe tener en cuenta distintos parámetros de modelación como:

- Determinar el tipo de análisis para el modelo (estacionario o transitorio).
- Condiciones iniciales de modelación.
- Propiedades para la interacción de los fluidos.
- Condiciones de borde sobre el dominio.
- Resolución numérica.
- Tiempo.
- Configuración del control de *Solver*.

5.8.3. Procesamiento

Según Noblecilla Palomino (2019), en esta etapa el programa se encarga de resolver las ecuaciones que describen el fenómeno natural por medio de iteraciones, empleando la configuración establecida en la etapa de Pre proceso.

Mediante tablas y gráficos mostrados automáticamente se puede observar el avance de la solución en el transcurso del tiempo y por iteraciones. Por defecto se presentan tres monitores en los cuales se grafican los criterios de convergencia (valores residuales promedio RMS o valores residuales máximos MAX) que arrojan los resultados de las ecuaciones. De ser necesario, se puede ingresar nuevos monitores a fin de observar el avance de la solución de alguna variable de interés.

De esta manera, la finalización de la solución se llevará a cabo gracias al criterio de convergencia (se habla de este criterio en el acápite 6.3.1. de este mismo capítulo), el cual se encarga de detener el cálculo de las ecuaciones de movimiento.

5.8.4. Post proceso

Consiste en la discusión de los resultados obtenidos, analizando los resultados de los cálculos realizados por el *Solver*. El análisis puede realizarse mediante gráficos animados, incluye la obtención de valores puntuales hasta secuencias animadas. Se dice que a medida que

los errores obtenidos en las ecuaciones disminuyan, los resultados se acercarán más a lo requerido, cumpliendo así con el criterio de convergencia.

De esta manera en el módulo de Results, podremos observar las variables influyentes sobre la estructura diseñada, por ejemplo:

- Los contornos de la superficie libre y los vectores de velocidad a lo largo de un tramo de la estructura.
- Se pueden obtener gráficos de otras variables como presiones o velocidades en cada una de las direcciones X, Y o Z.
- Gráficos vectoriales que muestran la dirección y magnitud del flujo.
- Incluso animación.

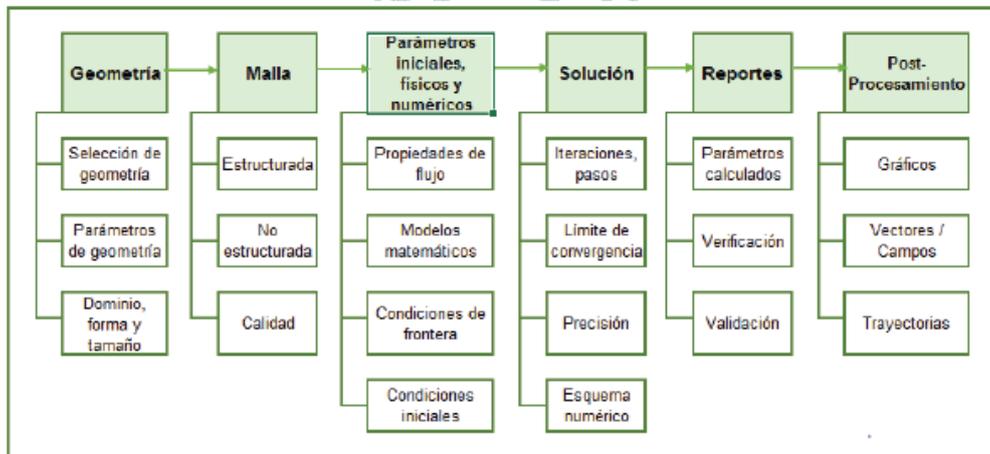


Figura 31. Procesos en Ansys CFX.

Fuente: Carrera, 2019.

Capítulo 6

Modelación del sifón con Ansys CFX

En el presente capítulo se lleva a cabo la modelación numérica del sifón Piura, el cual nos permitirá visualizar y estudiar el comportamiento del flujo que atraviesa. Para el desarrollo de esta simulación se ha hecho uso del programa Ansys CFX y su plataforma de diseño de proyectos “Ansys *Workbench*”; y así poder realizar el análisis de dinámica de fluidos computacional.

6.1. Ansys Workbench

Ansys *Workbench* es una plataforma de software donde se crean los proyectos de análisis en diferentes disciplinas, además permite visualizar gráficamente el intento de la simulación en el *Project Schematic* tal como se puede ver en la Figura 32 y 33, establecer las relaciones entre fenómenos físicos y determinar que archivos se utilizaron para una simulación particular.

De esta manera, el uso de este programa busca obtener algunos parámetros o variables como resultado de la interacción entre el fluido y la estructura y así contar con una herramienta de solución frente a un problema real.



Figura 32. Esquema final de nuestro proyecto en Ansys *workbench*.
Fuente: Elaboración propia.

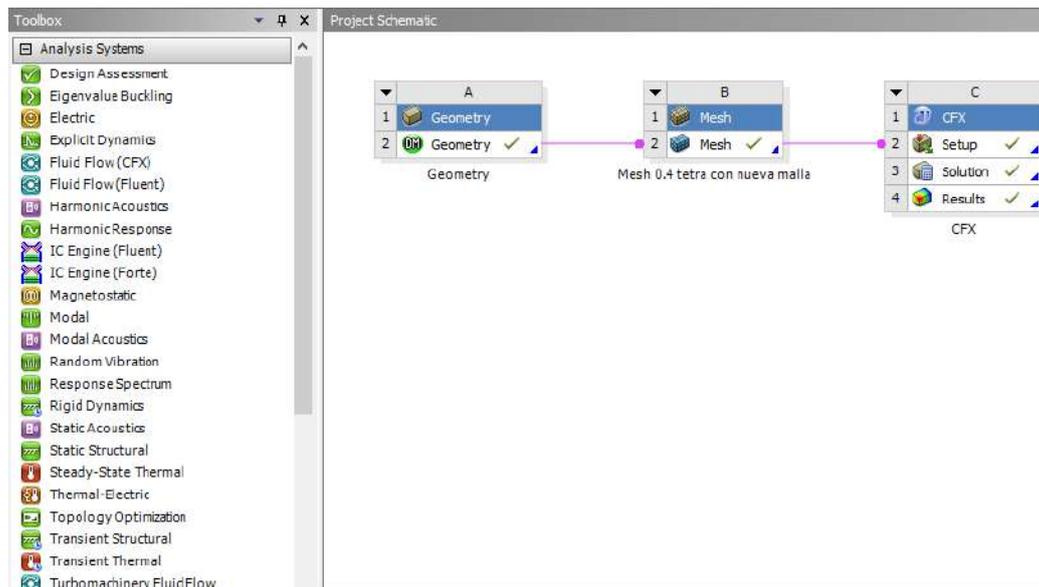


Figura 33. Interfaz *workbench* de nuestro proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Esquema del proyecto: Preprocesamiento

6.2.1. Geometría

6.2.1.1. Digitalización de planos

Los planos de la geometría real del sifón Piura son la base de toda esta investigación y necesarios para poder llevar a cabo modelación numérica apropiadamente, sin embargo, por su antigüedad, el Proyecto Especial Chira Piura (PECHP) solo contaba con los planos físicos. Estos planos, fueron realizados en marzo de 1982 y encargados para su diseño al Consorcio IECO-SALZGITTER LAGESA, bajo supervisión de ENERGOPROJEKT.

6.2.1.2. Creación de la estructura hidráulica

Se puede realizar una versión digital de los planos a través del programa AutoCAD para posteriormente exportarlo a Ansys CFX. Sin embargo, en este caso la geometría del sifón se elaboró bajo las herramientas que otorga Ansys CFX, siguiendo los pasos explicados a continuación:

1. En la Figura 34 se observa que sobre la celda *Geometry* se da clic derecho y al desplegarse una lista de opciones, seleccionamos el entorno “*New DesignModeler Geometry*”.
2. Aparecerá la ventana de trabajo sobre la cual se diseñará la geometría por analizar. Se puede visualizar en la Figura 35 la barra de herramientas, el árbol de operaciones, ventana de

detalles, ventana de modelado, entorno gráfico. Todas estas opciones permiten crear y modificar estructuras en 3D, cada uno con una función diferente.

- Así se procede a ubicar un plano dentro del árbol de operaciones como se ve en la Figura 36, luego se trazará el boceto del sifón con las dimensiones que están en los planos del modelo real del sifón. Posterior a esto se utiliza la herramienta *extrude* para dar anchura al diseño, también se da uso a herramientas como *Sweep*, *Skin*, *Line*, *Corner*, *Trim*, *Chamfer*, etc, mostrando así la geometría de la estructura como se ve en la Figura 37.
- Finalmente, al cerrar la ventana, se guardará automáticamente. Aparecerá un *check* verde al costado de *Geometry*, el cual indicará que está correcto.

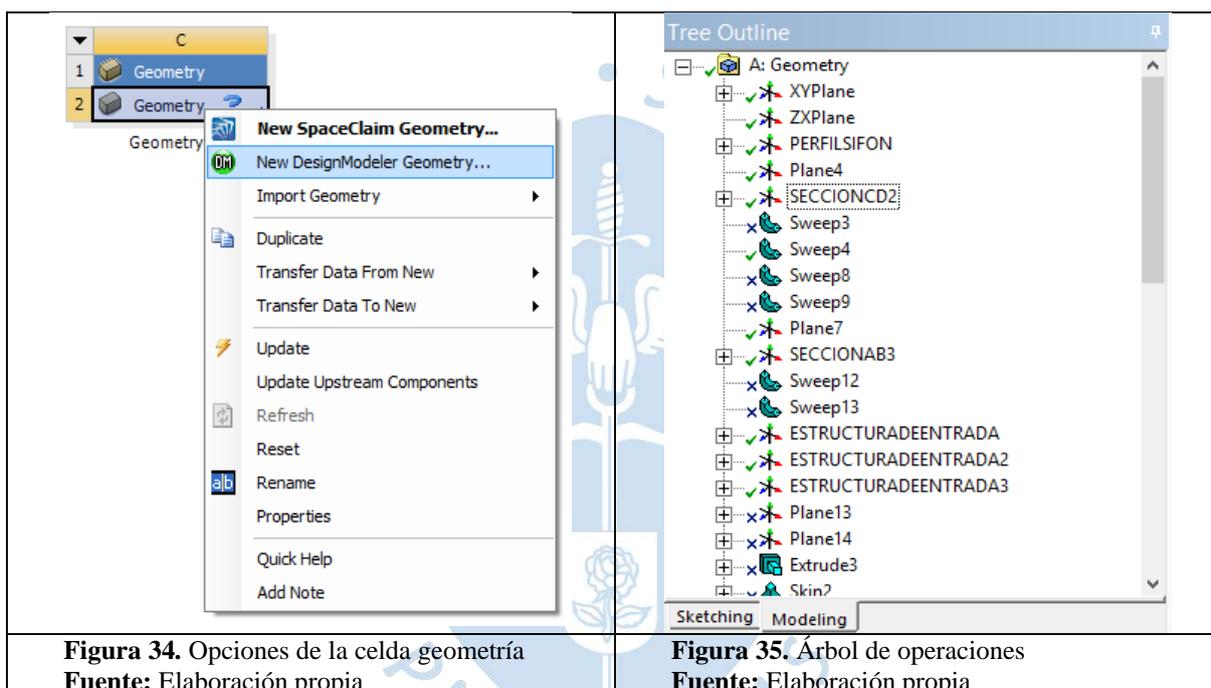


Figura 34. Opciones de la celda geometría
Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Árbol de operaciones
Fuente: Elaboración propia

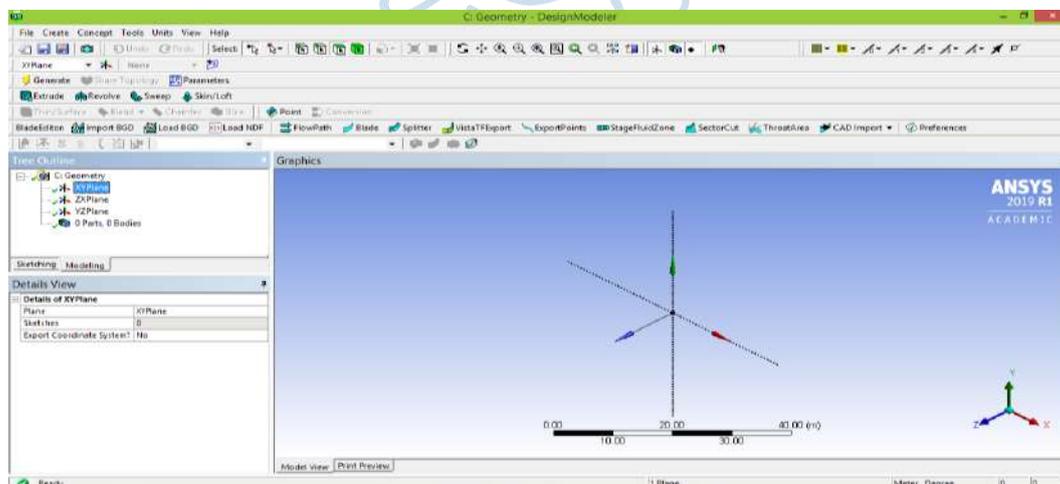


Figura 36. Vista del espacio de trabajo *design modeler*.
Fuente: Elaboración propia.

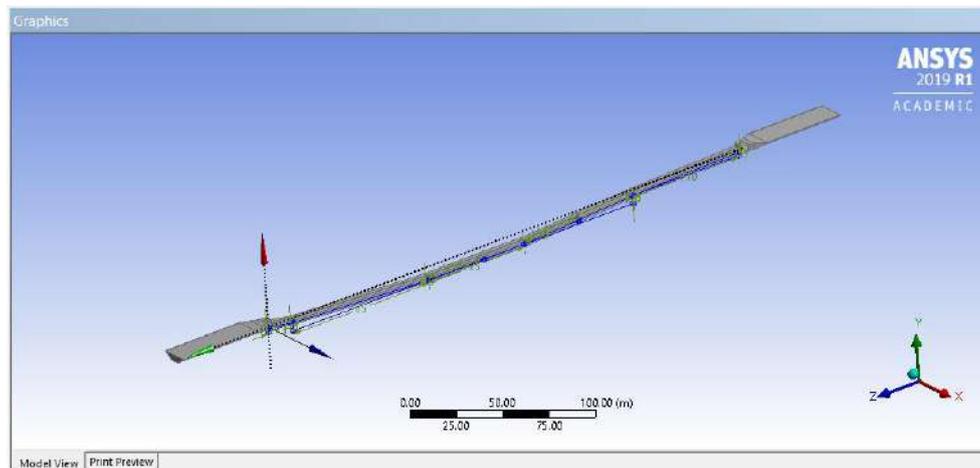


Figura 37. Vista del sifón diseñado.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2. Mallado

6.2.2.1. Creación de malla

Mediante la herramienta *Mesh* hallaremos una generación de malla eficiente. Como se detalla en los Apéndices A, la malla es resuelta mediante la comparación de los distintos métodos de mallado, dimensionamiento y calidad de malla. Dependiendo de la densidad de la malla la solución tendrá el éxito esperado, esta densidad es medida mediante la calidad del mallado.

Se podrá hacer un refinamiento de la malla que mejor se ajuste al caso y así que permita obtener mayor precisión en los resultados finales que reflejan la realidad.

Se procede a ingresar a la ventana de trabajo de *mesh* para la elaboración del mallado sobre nuestra geometría realizada, tal como observamos en la Figura 38. Posteriormente se mostrará el área de trabajo del mallado como se ve en la Figura 39.

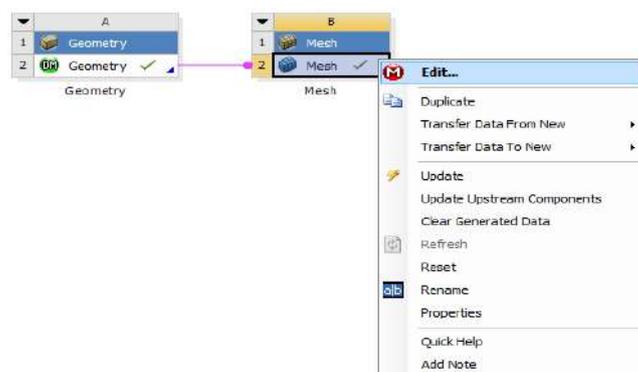


Figura 38. Opciones de la celda *mesh*.

Fuente: Elaboración propia.

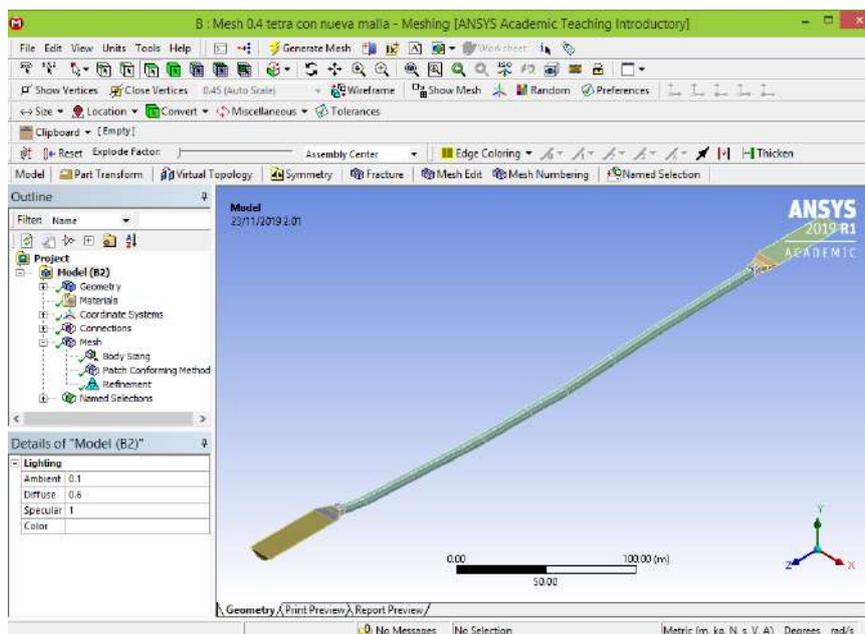


Figura 39. Área de trabajo *meshing*.

Fuente: Elaboración propia.

- **Método de mado**

Como se explicó en el capítulo 5, Ansys CFX presenta tres tipos de mallas: tetraédrico, hexaédrico e híbrido (combinación de los dos anteriores), los cuales serán evaluados.

Es recomendable hacer una comparación de resultados para cada proyecto en estudio, permitiendo descartar el uso de otro tipo de mallado, ya que la forma de la geometría tendrá bastante influencia, es decir un grado de complejidad regular como la de nuestro estudio, las mallas no estructuradas de tipo tetraédrica mostrarán muchas ventajas, ya que permiten mayores relaciones de aspecto y menor tiempo de elaboración de malla con rápida velocidad de cálculo. El método hexaédrico será de uso adecuado mayormente en geometrías de tramos rectos. El tipo de método que se aplica, se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- Como se ve en la Figura 40, escogeremos el tipo de mallado con la herramienta *Mesh Control*.

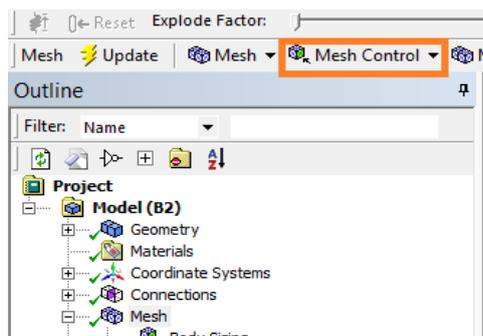


Figura 40. *Mesh control*.

Fuente: Elaboración propia.

- En la Figura 41, se puede ver las opciones del *Mesh Control*. Se selecciona la opción *Method*.
- En la Figura 42, se puede ver las opciones para seleccionar el método de mallado.

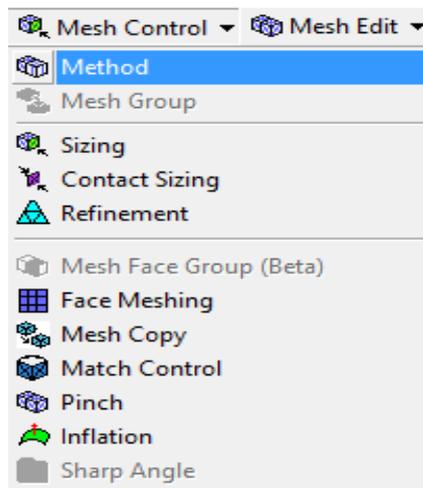


Figura 41. Opciones de *mesh control*.
Fuente: Elaboración propia.

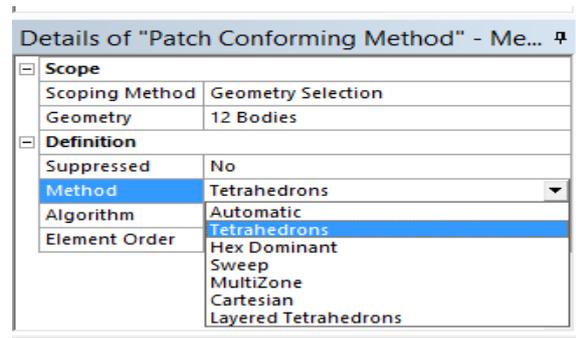


Figura 42. Diferentes tipos de métodos de malla que Ansys CFX posee.

Fuente: Elaboración propia.

- En la Figura 43, se observa que, una vez seleccionado el método de mallado, se generará la malla haciendo clic derecho sobre la opción *Mesh* y luego *Generate Mesh*.

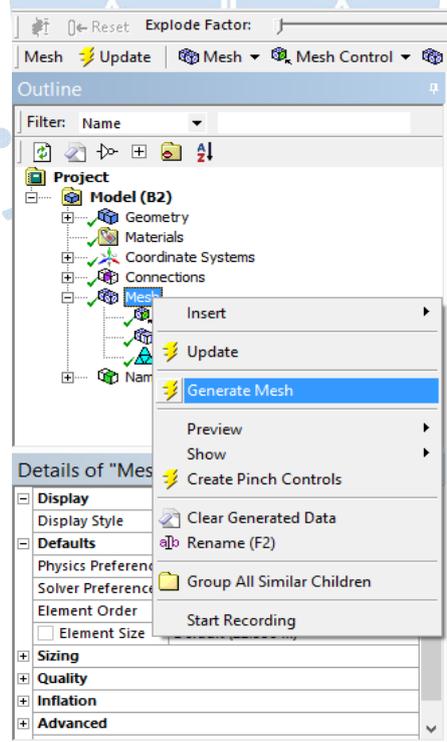


Figura 43. *Generate mesh*.

Fuente: Elaboración propia.

La opción de *Generate mesh* de la ventana *Outline*, permite generar el mallado sobre el objeto de estudio.

- **Dimensionamiento y calidad del mallado**

Este apartado consiste en decidir por el tipo de dimensión que tendrá un elemento de la malla, el cual otorga mayor precisión en la obtención de resultados. Manteniendo las condiciones iniciales y el método tetraédrico elegido para el proyecto, se evaluará la variación de resultados obtenidos usando diferentes dimensiones del elemento de malla.

- Usando la herramienta *Sizing* alternará las dimensiones para obtener nuevos resultados. Se elige la geometría que desea modificarse: las paredes del sifón, laterales del canal, la entrada y salida del canal o el fondo. Posterior a esto, se selecciona el tipo de *Sizing* que se aplicará, es decir el tipo *Element Size*, el cual indica el tamaño del elemento finito, como se ve en la Figura 44.

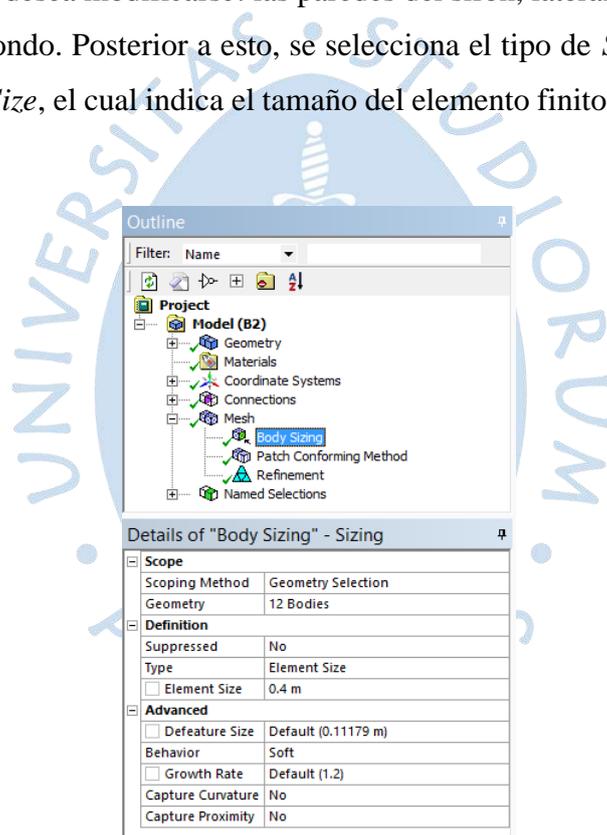


Figura 44. Herramienta *sizing*.

Fuente: Elaboración propia.

- Como se ve en la Figura 45, se ha incluido también el uso de la herramienta *Refinement*, una vez seleccionado esta herramienta, se escogerá el vértice, cara o arista que se quiera modificar. Este refinamiento permitirá localizar con mayor precisión una de las fronteras del sifón.

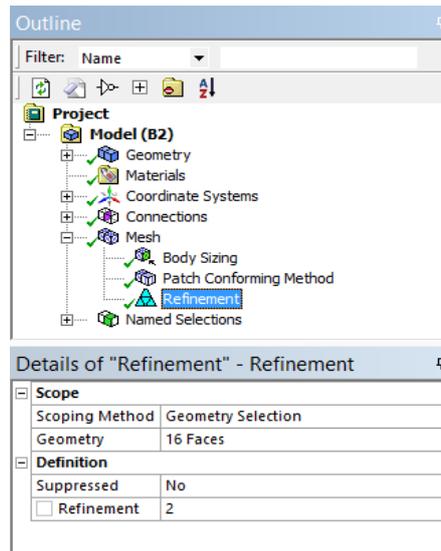


Figura 45. Herramienta *refinement*.
Fuente: Elaboración propia.

- Se evaluarán las dimensiones de 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m, 0.5 m, para el elemento diferencial, posteriormente se procede a generar la malla. En la Figura 46 se ve aplicada la malla de tamaño 0.4 m.

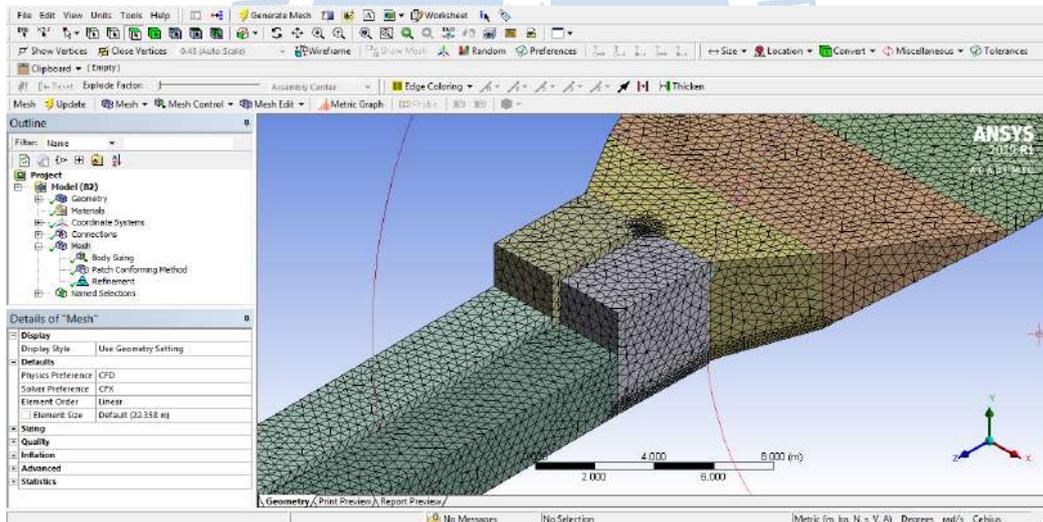


Figura 46. Mallado con dimensión 0.4 m.
Fuente: Elaboración propia

Los valores conseguidos por la calidad de malla se pueden visualizar en la ventana de *Details of Mesh*, como se ve en la Figura 47. Luego seleccionando la opción *Quality* elegir entre los parámetros de estudio más importantes que hemos considerado: *Orthogonal Quality*, *Element Quality*, *Skewness* y *Aspect Ratio*.

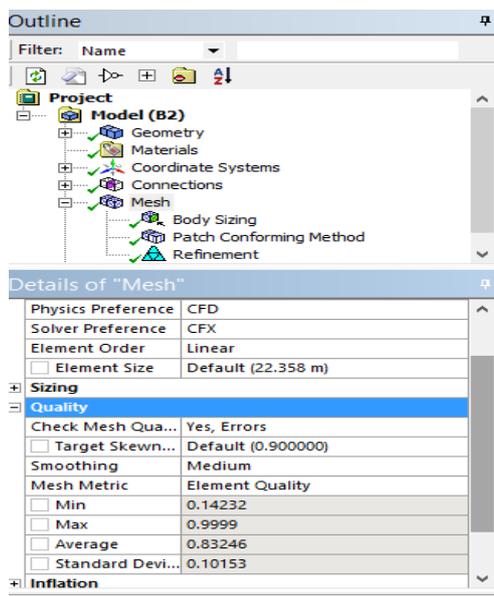


Figura 47. Opción *quality* que permite visualizar la calidad de la malla.

Fuente: Elaboración propia.

En el capítulo 5 se explicó la definición de estos parámetros que miden la calidad de los elementos de un mallado. Entre los más importantes, analizaremos los que se muestran en las siguientes Figuras 48, 49, 50 y 51:

a. *Orthogonal Quality*.

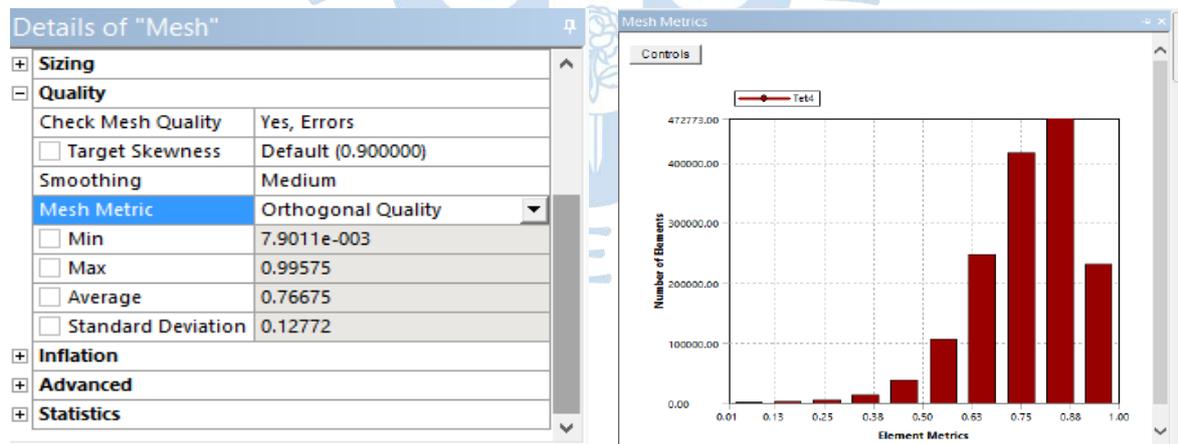


Figura 48. *Orthogonal quality* de la malla 0.4

Fuente: Elaboración propia.

b. *Element Quality.*

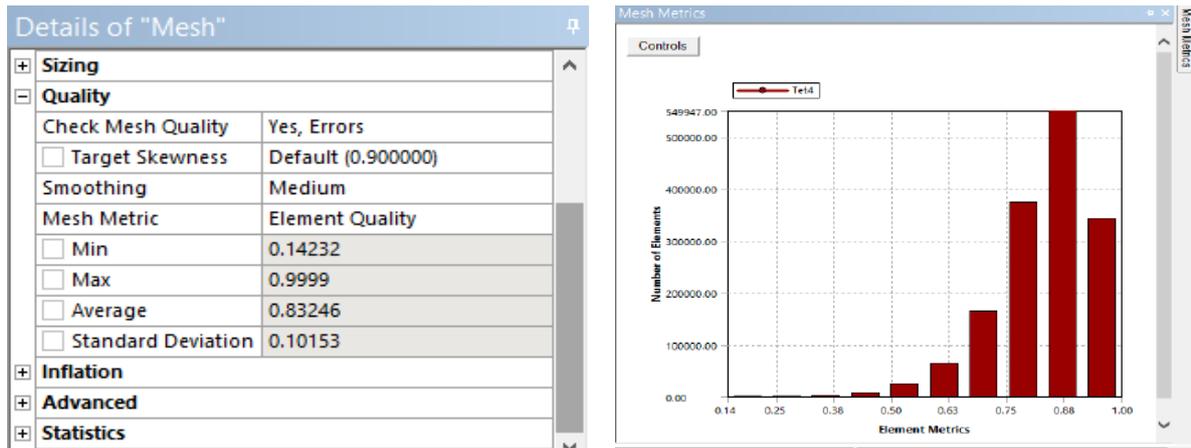


Figura 49. *Element quality* de la malla 0.4.
Fuente: Elaboración propia.

c. *Skewness*

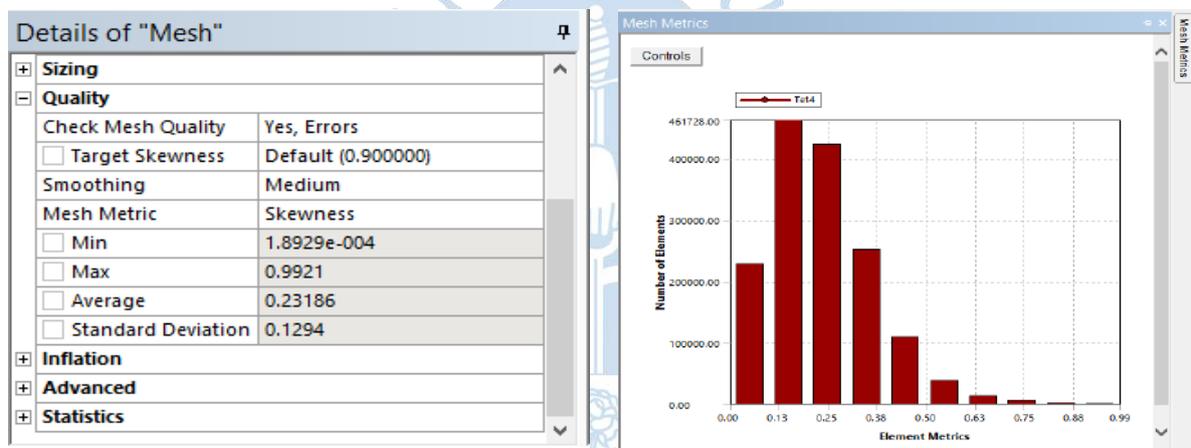


Figura 50. *Skewness* de la malla 0.4.
Fuente: Elaboración propia.

d. *Aspect Ratio*

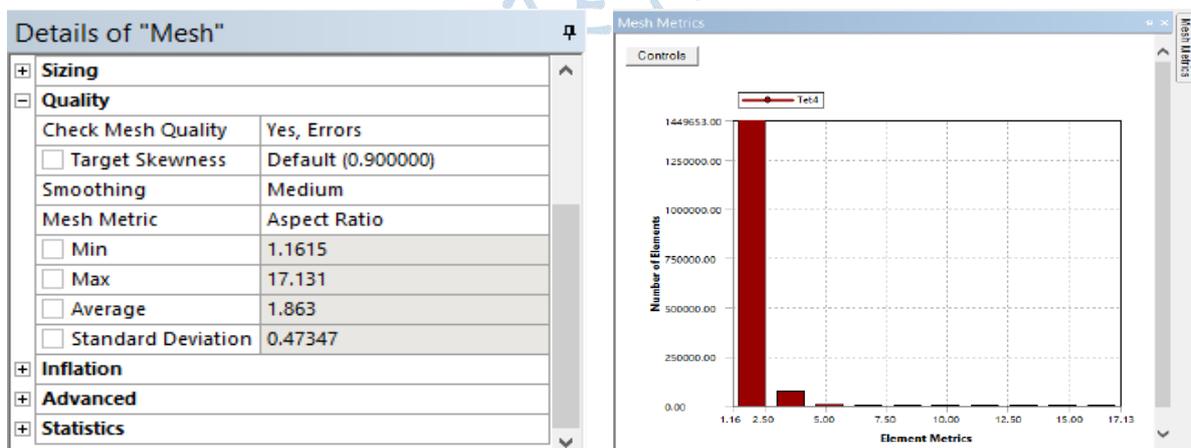


Figura 51. *Aspect ratio* de la malla 0.4.
Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento se repite para cada alternativa de dimensión de mallado, obteniendo los siguientes resultados:

- La Tabla 29 muestra la clasificación para cada alternativa de dimensionamiento del mallado, evaluados a través de su Calidad de Malla.

Tabla 29. Parámetros de calidad de la malla.

Dimensiones del mallado	Tipo de mallado	Parámetros resaltantes			
		Element Quality	Orthogonal Quality	Skewness	Aspecto Ratio
0.2 hexaedro	Estructural	0.90552	0.97268	6.86E-02	1.9007
0.3 hexaedro	Estructural	0.86538	0.94191	9.90E-02	2.1386
0.4 hexaedro	Estructural	0.86471	0.96121	9.12E-02	1.8209
0.5 hexaedro	Estructural	0.86366	0.95339	0.10404	1.8001
0.2 Híbrido	Híbrido	0.8736	0.82582	0.17865	1.6751
0.3 Híbrido	Híbrido	0.86844	0.81812	0.18514	1.6956
0.2 tetraedro	No estructural	0.84251	0.78183	0.21685	1.8258
0.3 tetraedro	No estructural	0.83711	0.77396	0.2247	1.8451
0.4 tetraedro	No estructural	0.83246	0.76675	0.23186	1.863
0.5 tetraedro	No estructural	0.82862	0.76069	0.23775	1.8765

Fuente: Elaboración propia.

- Otra vez es importante señalar que la velocidad con que obtenemos la elaboración del mallado y simulación, dependerán de la capacidad computacional de nuestra PC. Es decir, mientras más pequeño sea el dimensionamiento mayor será el tiempo de cálculo.

- Los resultados obtenidos durante las simulaciones y el post procesamiento se encuentran en el Apéndice B.

- Conocemos los requisitos que debe cumplir cada parámetro, sin embargo, al observar los gráficos obtenidos en la etapa del procesamiento de simulación, vemos que no todos cumplen el criterio de convergencia, esto lo podemos observar sobre todo en mallas del tipo estructural e híbrido. Por ello, solo se hará una comparación entre el dimensionamiento del mallado de tipo no estructural en las Figuras 52, 53, 54 y 55.

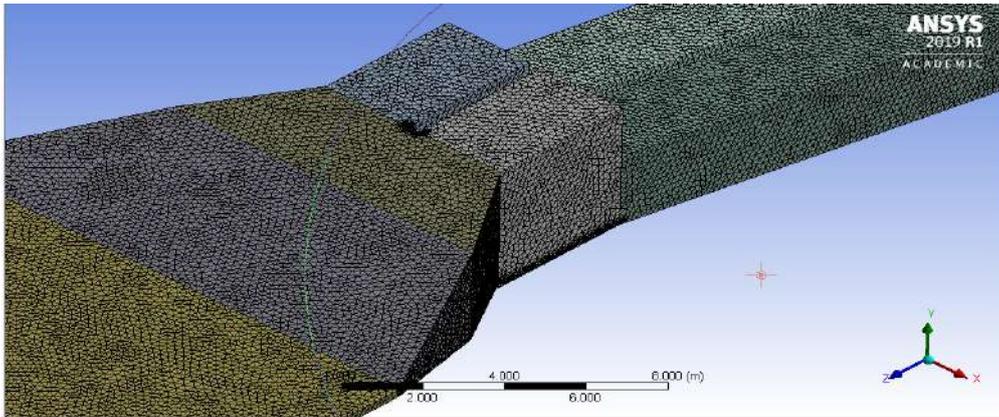


Figura 52. Dimensión de malla 0.2.
Fuente: Elaboración propia.

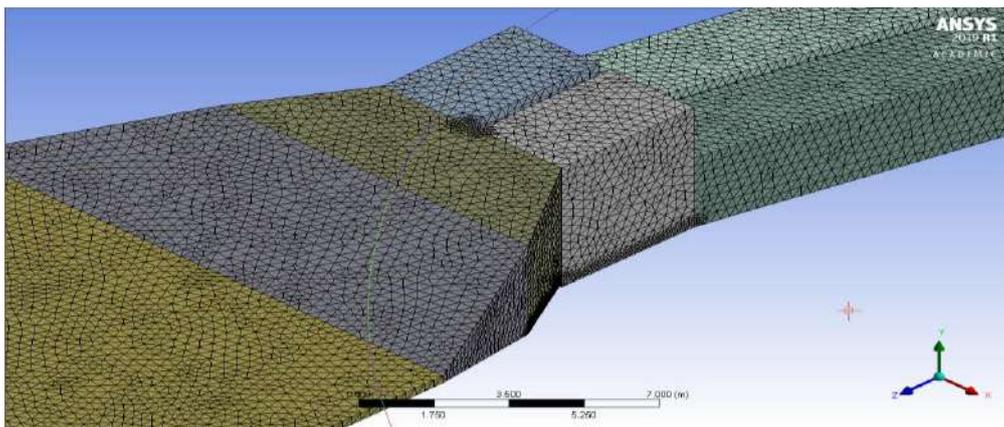


Figura 53. Dimensión de malla 0.3.
Fuente: Elaboración propia.

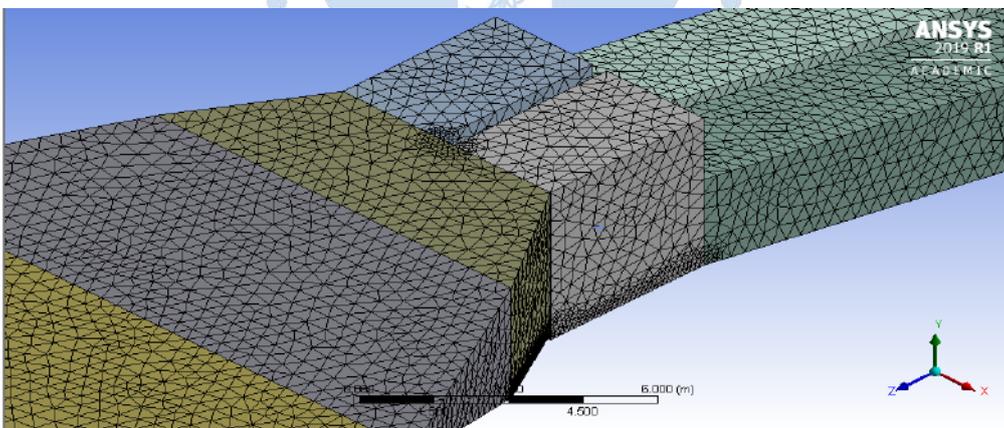


Figura 54. Dimensión de malla 0.4.
Fuente: Elaboración propia.

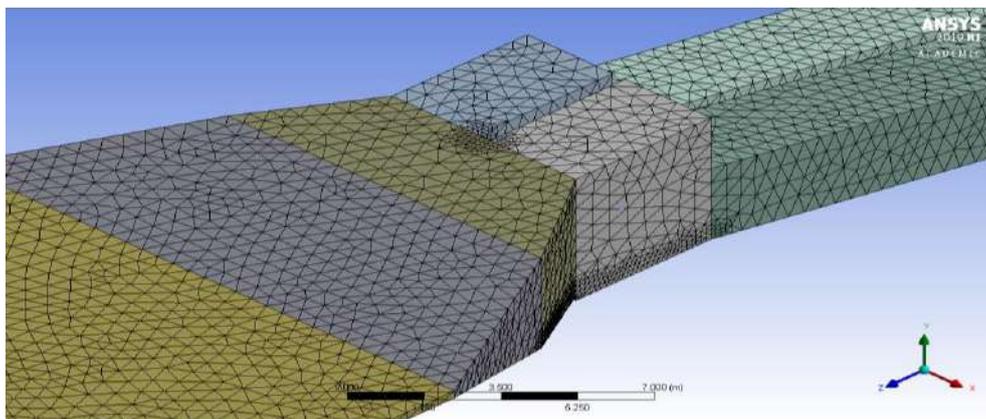


Figura 55. Dimensión de malla 0.5.

Fuente: Elaboración propia.

- En el Apéndice B-1 se muestran los gráficos resultantes de la etapa de procesamiento en un tipo de malla estructurada. Es importante evaluar cada uno de ellos y verificar que cumplan con los criterios de convergencia y en el resultado se obtuvo que todas las alternativas evaluadas no cumplían con lo establecido. El principal de todos es la gráfica de los residuos promedios de los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de conservación de Momentum y masa, dado que no muestra que los residuos se encuentren por debajo del valor del RMS, el cual al menos debe ser 0.0005.

- En el Apéndice B-2 se muestran los gráficos resultantes de la etapa de procesamiento en un tipo de malla híbrida. Los gráficos obtenidos desde el primer dimensionamiento de malla, la 0.2 m, muestra un comportamiento similar a la malla estructurada, añadiendo que el gráfico que mide la turbulencia muestra resultados divergentes. Es por ello, se rechaza el tipo de malla híbrido, el cual viene a ser una combinación de una malla estructurada y no estructurada.

- En el Apéndice B-3 se muestran los gráficos resultantes de la etapa de procesamiento en un tipo de malla no estructurada. De todas las dimensiones evaluadas, la dimensión 0.2 m es la única que no cumple, mientras que 0.3, 0.4 y 0.5 cumplen. En el gráfico de los residuos promedios de los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de turbulencia, se observa que la simulación se ha detenido cuando la última línea que marca los RMS W-Mom (dirección Z) alcanza el residuo de 0.005, lo cual es correcto. El gráfico que mide la turbulencia se encuentra en estado natural, es decir no describe cambios bruscos. El gráfico de las variables que han sido seleccionadas para su estudio, muestra un comportamiento constante de las variables evaluadas. El gráfico de imbalances de las ecuaciones que rigen el comportamiento del fluido, tienden a resultados menores a 1%, alcanzando el criterio deseado. Finalmente, el gráfico que mide la cantidad de caudal que ingresa y sale de la estructura, representa que la cantidad de caudal de

agua que ingresa al final, es la misma que sale de dicha estructura, tal como en teoría debe ser. Sus resultados en la calidad de malla, son bastante aproximados, por lo que tendrán que compararse con los resultados reales para comprobar cual mallado es el más adecuado. En el último capítulo se detallará con amplitud esta comparación de resultados.

- En el Apéndice B-4 se presenta el perfil de velocidades en distintas secciones del canal y del sifón. Dado que son tres las dimensiones de malla que cumplen con el criterio de convergencia (0.3, 0.4 y 0.5) y los valores obtenidos en los parámetros de calidad de malla son aproximados entre sí, se refuerza la verificación del modelo numérico a través de los perfiles de velocidad sobre la estructura hidráulica. Se muestra en las Figuras 144 hasta la 155.

Ven Te Chow (1994), expone en su libro Hidráulica De Canales Abiertos, afirma “La máxima velocidad media en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 m a 0.25 m de la profundidad; cuanto más cerca de las bancas, más profundo se encuentra este máximo”.

Además, tenemos que la distribución de velocidades en una sección del canal depende de los siguientes factores:

- La velocidad de un canal no es uniformemente distribuida, debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción.
- La forma inusual de la sección del canal.
- Rugosidad del canal, se refleja en la resistencia ofrecida por las paredes y el fondo del canal.
- Presencia de curvas.
- Acción centrífuga del flujo.
- Resistencia ofrecida por la atmosfera y la presencia de viento (aunque con poco efecto sobre la velocidad).

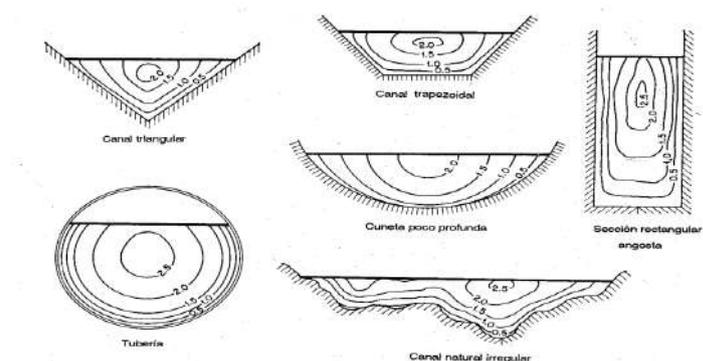


Figura 56. Curvas de velocidad en diferentes secciones de canal.
Fuente: (Ven Te Chow, 1994).

Analizando los perfiles de velocidades del apéndice B-4, muestran claramente algunas semejanzas entre las secciones tomadas para cada dimensión de mallado. Los criterios que se evaluaron son las siguientes:

- Cumple con las observaciones realizadas por Ven Te Chow, en cada sección del canal y del sifón. (Figura 56).
- La presencia de turbulencia en los extremos del canal se ve reflejado a través de los perfiles de velocidad.
- La calidad de malla en el desarrollo del proyecto y sus resultados son aceptables.
- Para determinar el tipo de malla que nos ayude a reflejar los valores reales de las variables que intervienen en el canal y el sifón, será necesario incluir un análisis de resultado de las presiones que existen en la estructura. Esto será evaluado en el capítulo final de esta investigación.

Como complemento se debe registrar el número de elementos que se forman en el dominio, para ello nos mantenemos en Details of Mesh, y luego clic sobre la opción de Statistics y se mostrarán los datos como se ve en la Figura 57.

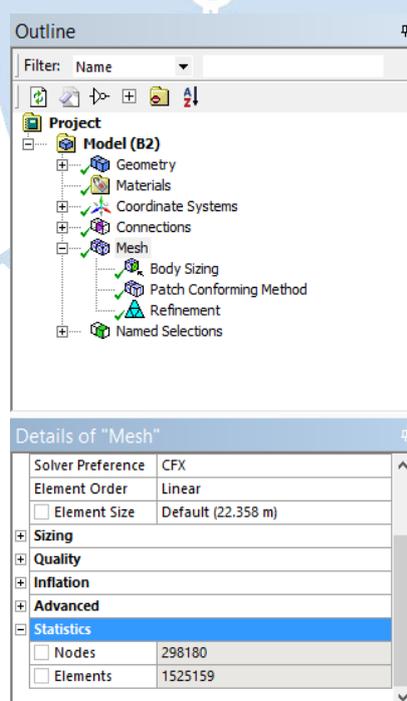


Figura 57. Elementos y nodos del mallado.
Fuente: Elaboración propia.

Encontramos una cantidad de nodos de 298 180 y una cantidad de 1 525 159 de elementos, los cuales se han podido resolver sin inconvenientes debido al alto rendimiento de la PC trabajada y a la disponibilidad de una licencia autorizada para modelación numérica en Ansys. Sin embargo, es importante indicar que existen unas excepciones cuando no se cuenta con una licencia. El sitio web de Ansys, otorga a los estudiantes o personas que quieran aprender a usar el software, la opción de descargar el programa con una versión llamada Ansys Student. Esta versión de Ansys tiene límites para realizar simulaciones en su plataforma. Por ejemplo, permite solo de 512 000 nodos y 1 200 000 de elementos en la configuración del mallado; si se excede de estos valores, el programa arroja un aviso de error en el proceso de simulación.

6.2.2.2. Condiciones de borde

Las condiciones reales del flujo deben ser desarrolladas por las condiciones de frontera. Por eso es necesario que las superficies del cuerpo del fluido tengan nombres característicos para poder brindarles las propiedades adecuadas. Tenemos así:

- La entrada (Inlet)
- La salida (Outlet)
- La superficie libre (Opening)
- Las paredes (Wall)

Los siguientes pasos nos permiten asignar las zonas de interés sobre nuestro diseño, posterior a la creación del mallado:

1. Se empieza seleccionando la superficie del plano o frontera que deseamos nombrar, esto se puede ver en la Figura 61.
2. Seleccionado la zona de interés, en la Figura 58 mostramos que se da clic derecho y se selecciona la opción *Create Named Selection (N)*.
3. Luego se colocará el nombre deseado a la superficie seleccionada. (Figura 59).
4. Finalmente, en la Figura 60 vemos que, ya colocadas todas las secciones en estudio, estas aparecerán en la opción de *Named Selections* de la pestaña *Outline*.

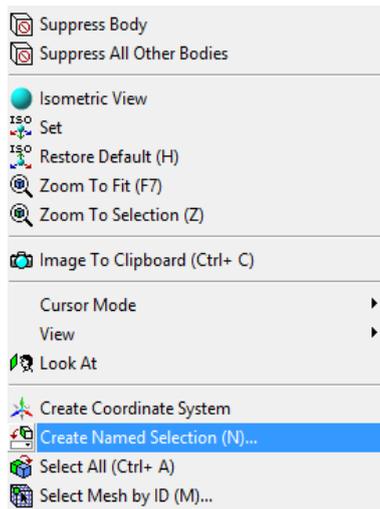


Figura 58 Create named selection.
Fuente: Elaboración propia

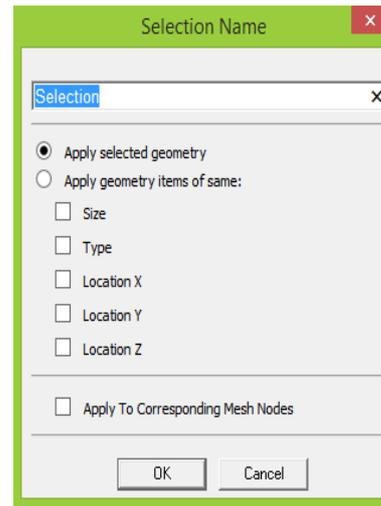


Figura 59. Asignar nombre a sección.
Fuente: Elaboración propia

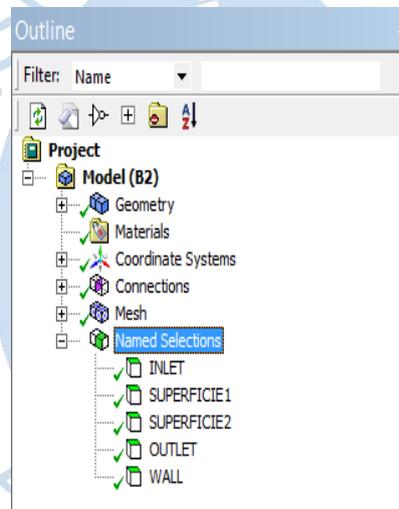
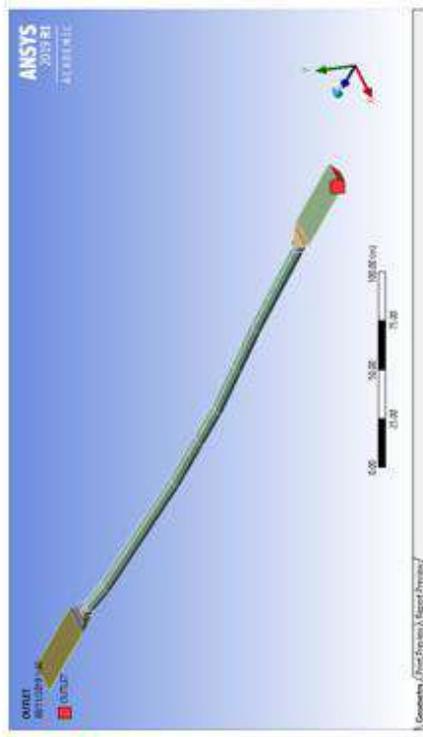
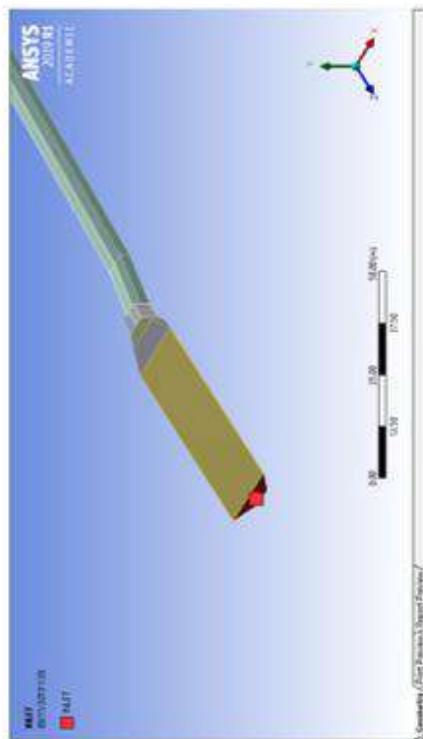


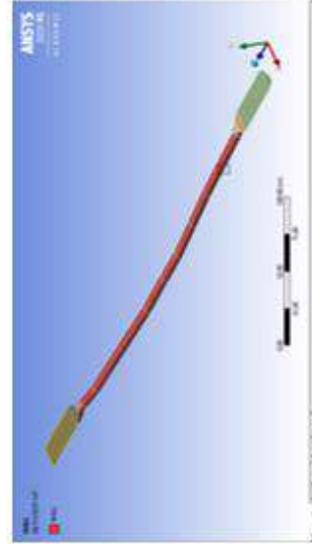
Figura 60. Nombre de las secciones.
Fuente: Elaboración propia.



SALIDA (OUTLET)



ENTRADA (INLET)



PAREDES (WALL)



SUPERFICIE 2 (OPENING)



SUPERFICIE 1 (OPENING)

Figura 61. Secciones de frontera.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.3. Configuración

La celda *Setup*, del esquema del proyecto permite realizar las configuraciones realizadas en la estructura a analizar y mostrar errores o falta de información previa a la simulación. Para ingresar al área de trabajo (Figura 63), se hace un clic derecho seguido de clic sobre la opción *Edit*, esto se muestra en la Figura 62.

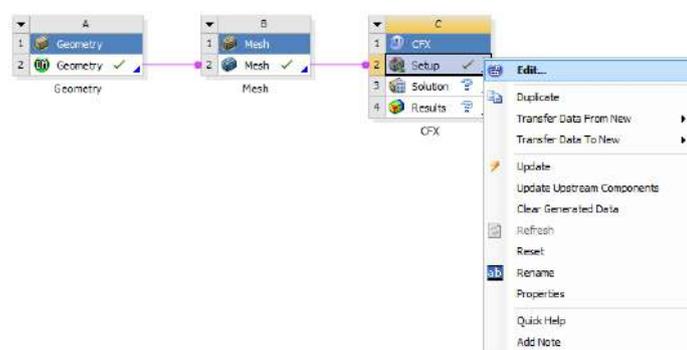


Figura 62. Opciones de la celda *Setup*.
Fuente: Elaboración propia.

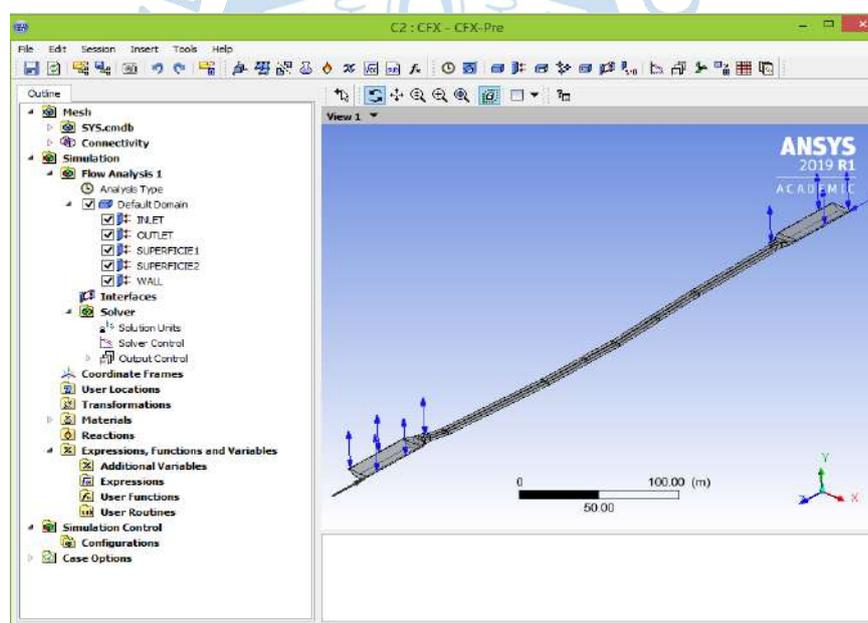


Figura 63. Área de trabajo en *Setup*.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.3.1. Generación del dominio

Utilizar el concepto de dominio sirve para establecer el tipo de región y sus respectivas propiedades, tanto para sólidos como fluidos. Las regiones donde se desarrollan las ecuaciones del flujo del fluido se les llaman dominio. Para ingresar los datos sobre el dominio, hacemos

clic sobre la opción *Default Domain* y a continuación clic sobre *Edit.*, esto se ve en la Figura 64.

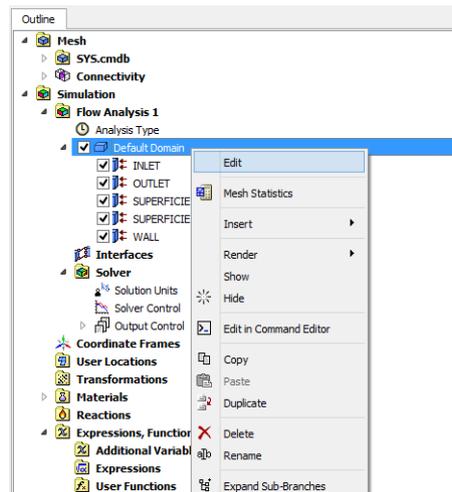


Figura 64. Configuración del dominio.
Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 65, 66, 67 y 68 se muestran los parámetros que configuran el dominio a través de las pestañas: *Basic Settings*, *Fluid Models*, *Fluid Pair Models* e *Initialization* (dependerá del tipo de análisis para su uso). La Tabla 30, resume los parámetros de configuración del dominio, para un análisis de tipo estacionario.

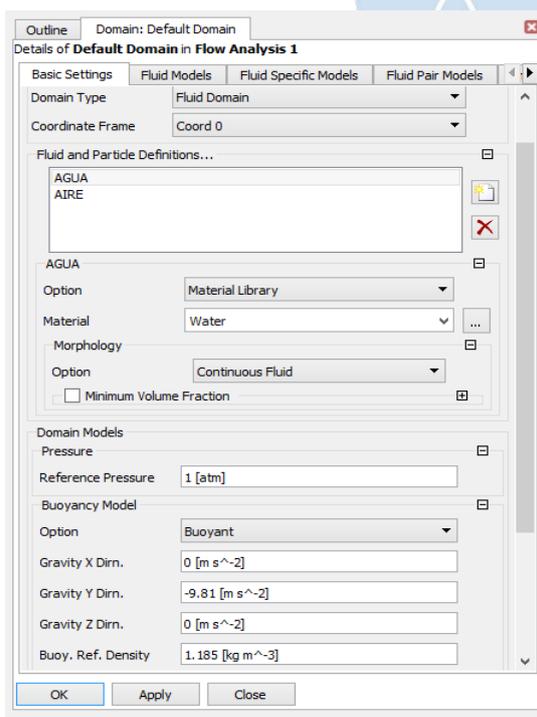


Figura 65. Propiedades del fluido.
Fuente: Elaboración propia.

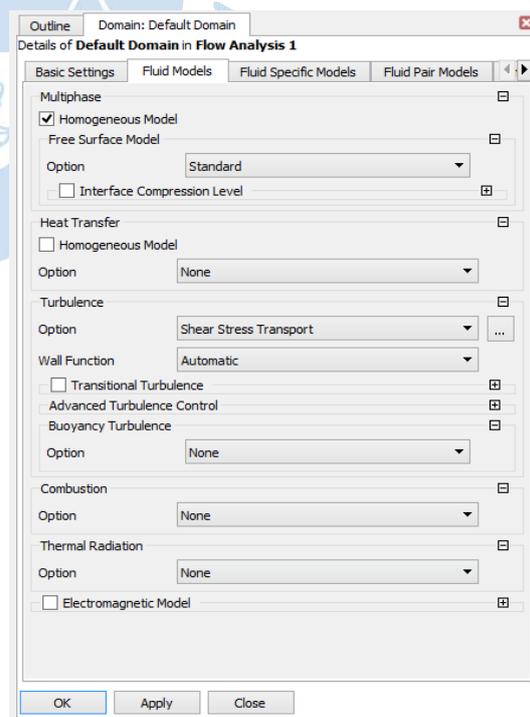


Figura 66. Modelo del fluido.
Fuente: Elaboración propia.

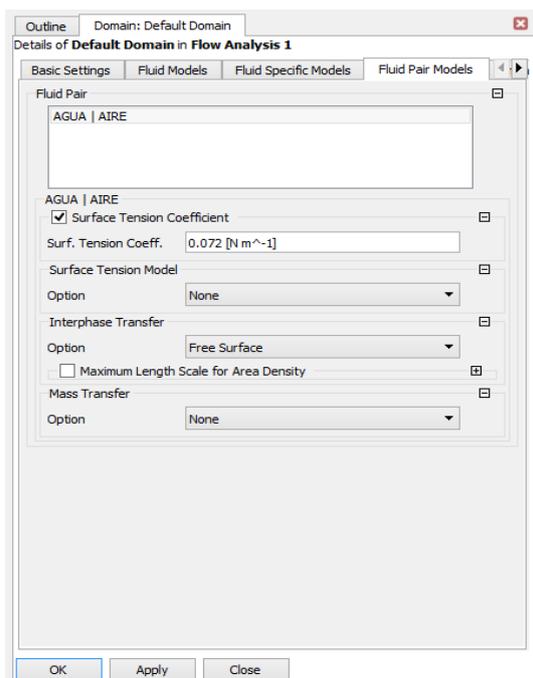


Figura 67. Interacción entre fluidos.

Fuente: Elaboración propia.

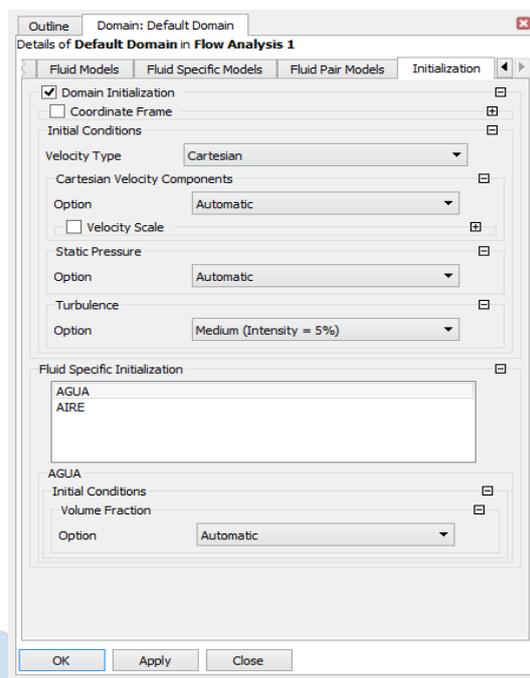


Figura 68. Configuración de las condiciones iniciales.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Parámetro de configuración del dominio.

Análisis del proyecto	
Tipo de análisis	Estacionario
Características del fluido	
Tipo de fluido	AGUA AIRE
Morfología	Fluido continuo
Presión de referencia	1 atm
Masa Molar	18.02 kg/kmol 28.96 kg/kmol
Densidad	997.0 kg/m ³ 1.185 kg/m ³
Viscosidad dinámica	8.899 E-4 kg/m s 1.831 E-5 kg/m s
Temperatura de referencia	25° C
Modelo de flotabilidad	Buoyant
Gravedad X y Z	0
Gravedad Y	-9.81 m/s ²
Coefficiente de flotabilidad	1.185 kg/m ³
Modelo multifásico	homogéneo
Modelo de superficie libre	Standard
Modelo de turbulencia	SST
Transmisión de calor	No
Coefficiente de tensión superficial	0.072 N/m
Transferencia en interfaces	Superficie libre
Transferencia de masa	Ninguno
Método de resolución	Volúmenes finitos
Inicialización	Sólo en análisis Transitorio

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3.2. Configuración del tipo de análisis

Existen dos tipos de análisis que permiten el desarrollo de la simulación, ya que ayudará a obtener el valor deseado de los residuos que arrojen las ecuaciones del movimiento de fluidos. Estas son tipos de análisis son: estacionaria y transitoria. Para esta investigación se trabajó con un tipo de análisis estacionario o estable, el cual tendrá mayor relevancia a la hora de verificar y comparar resultados reales; y como complemento se realizó un tipo de análisis transitorio con la finalidad de observar el movimiento real de flujo dentro del sifón.

- Estacionario: este tipo de análisis requiere un menor tiempo de análisis y una menor capacidad de almacenamiento de datos en el computador en comparación al transitorio. También permite colocar el valor residual de convergencia para los RMS como criterio de convergencia o para detener la simulación y con la finalidad de reducir los valores residuales se puede colocar un rango de iteraciones. Para seleccionar este tipo de análisis, hacemos clic sobre la opción *Analysis Type* y a continuación clic sobre *Edit.*, esto se ve en la Figura 69. Posteriormente, seleccionamos un análisis de tipo estacionario, esto se ve en la Figura 70.

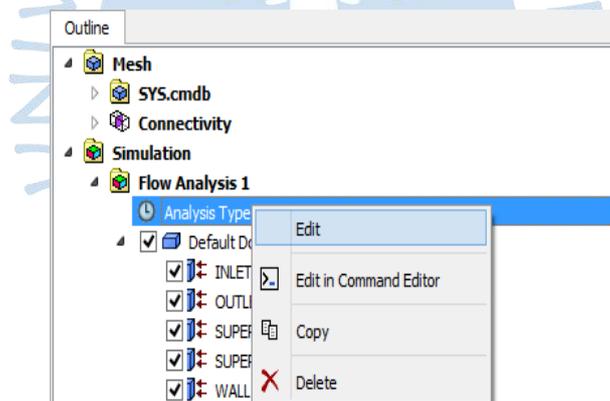


Figura 69. Configuración del tipo de análisis.
Fuente: Elaboración propia.

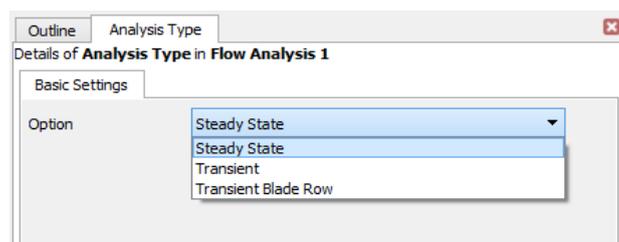


Figura 70. Tipo de análisis estacionario.
Fuente: Elaboración propia.

Además, con el objetivo de mejorar el tiempo de simulación y la calidad de los resultados se debe configurar las opciones del Control del solucionador o *Solver control*, como se ve en la Figura 71.

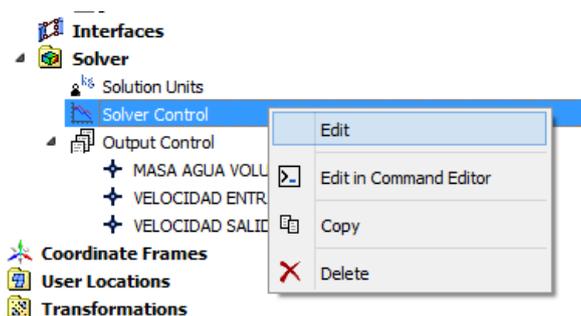


Figura 71. *Solver control*.
Fuente: Elaboración propia.

Dentro de las opciones del Control del solucionador o *Solver control*, configuramos el número de iteraciones que tendrá nuestra simulación, el tipo de residuo RMS, la calidad con la que se apreciará la turbulencia en los resultados y en las opciones avanzadas seleccionaremos un control sobre la fracción de volumen de los fluidos, opción *multiphase control*. Estas opciones de configuración se muestran en las Figuras 72 y 73 y el resumen de valores en la Tabla 31.

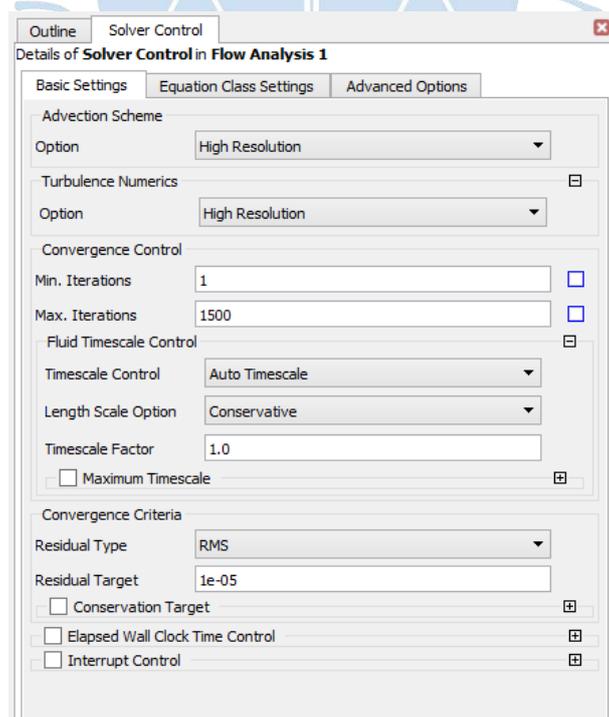


Figura 72. Configuración del *solver control*.
Fuente: Elaboración propia

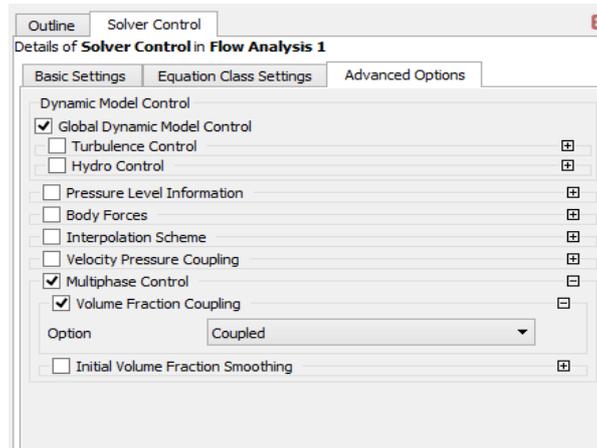


Figura 73. Opciones avanzadas del *solver control*.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Parámetros colocados para el control del solucionador.

Solver Control	
Esquema advection	High Resolution
Turbulencia numérica	High Resolution
Control de iteraciones	Min: 1 iteración Max: 1500 iteraciones
Control de escala de tiempo	Automatic Timescale
Criterio de convergencia	Tipo de residual: RMS Residuo: $RMS < 1.0 \times 10^{-5}$ y/o 1500 iteraciones
Control de multifase	Volumen de fracción acoplado

Fuente: Elaboración propia.

También se debe tener en cuenta el monitoreo de variables y si estos llegan a tener un equilibrio en el proceso de cálculo de las ecuaciones. Es necesario realizar este proceso ya que está incluido en uno de los criterios que se necesita para la convergencia. Para realizarlo, ingresamos a la opción Output Control como se puede ver en la Figura 74, luego se podrá hacer la configuración que permitirá hacer un control detallado sobre las variables que deseemos. (Figura 75 y 76).

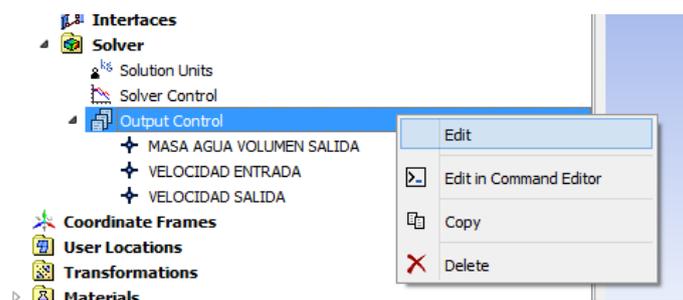


Figura 74. Opciones de *output control*.
Fuente: Elaboración propia.

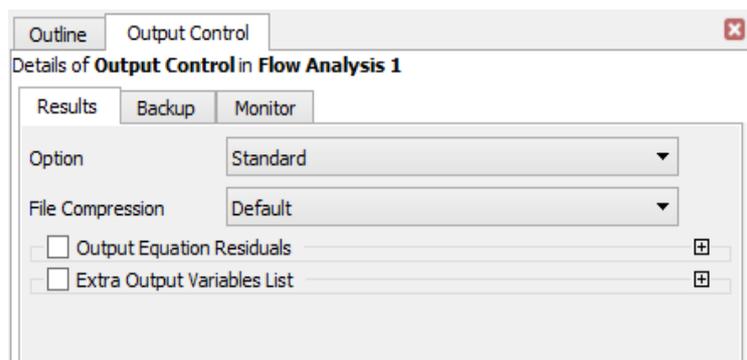


Figura 75. Configuración de *results* de la herramienta *output control*.
Fuente: Elaboración propia.

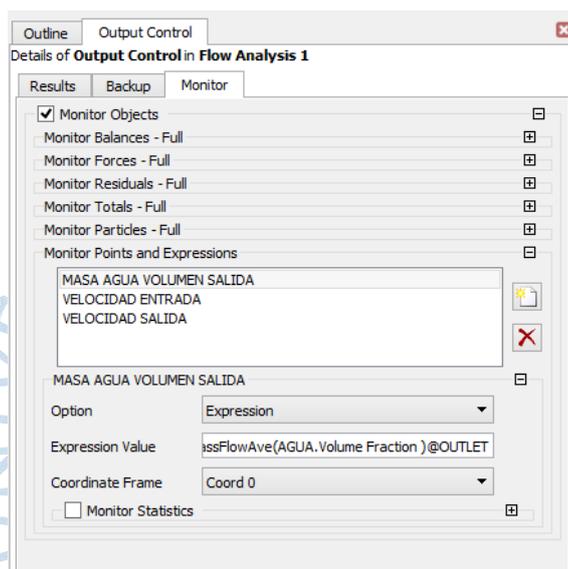


Figura 76. Configuración de *monitor*, opción que monitorea variables.
Fuente: Elaboración propia.

Luego de colocar los valores, se cierra la ventana del *Setup* y automáticamente aparecerá un *check* verde al lado de la opción *Setup*. (Figura 77).

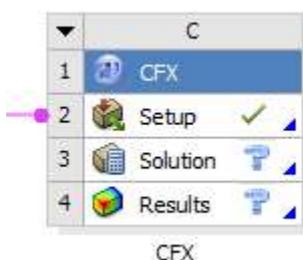


Figura 77. Cumplimiento del *setup*.
Fuente: Elaboración propia.

- Transitorio: Según Villarroel Quinde (2015), este tipo de análisis evalúa el momento temporal que permite estudiar la variable de interés. Además, refleja el comportamiento verdadero del flujo; requiere un mayor tiempo de análisis y una mayor capacidad de almacenamiento de datos en el computador en comparación al estacionario. Es necesario definir dos valores importantes antes de realizar una simulación transitoria: el paso de tiempo de la simulación y el tiempo total de simulación. El tiempo total de simulación será de 3 a 5 veces el tiempo de equilibrio del flujo y se define de la siguiente manera:

$$tr = \frac{\textit{longitud}}{\textit{Velocidad media}} \quad \text{Ecuación 1-77}$$

$$tr = \frac{21 \text{ m}}{1.5 \text{ m/s}}$$

$$tr = 14 \times 5 \text{ veces} = 70 \text{ s}$$

Se define el paso de tiempo de la simulación de la siguiente forma:

$$\Delta t_t = \frac{C \Delta x}{\textit{Velocidad media}} \quad \text{Ecuación 1-78}$$

$$\Delta t_t = \frac{7 \times 0.009}{1.5 \text{ m/s}}$$

$$\Delta t_t = 0.040 \text{ s}$$

Donde:

C = es el número de Courant el cual debe estar entre 2 y 10. Si se trabaja con un número de Courant pequeño, la simulación calcularía lento y si se trabaja con un número de Courant grande, la simulación quizá no captaría detalles esenciales del flujo.

Δx = el tamaño más pequeño de elemento de la malla.

De la misma manera que se realizó la configuración en el análisis estacionario, se ejecutará la configuración en el análisis transitorio (Figura 78), y se ingresarán los valores obtenidos en los cálculos de las ecuaciones mostradas. (Figura 79 y 80).

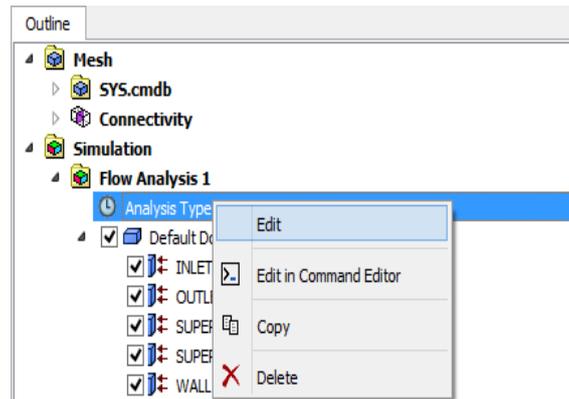


Figura 78. Configuración del tipo de análisis.
Fuente: Elaboración propia.

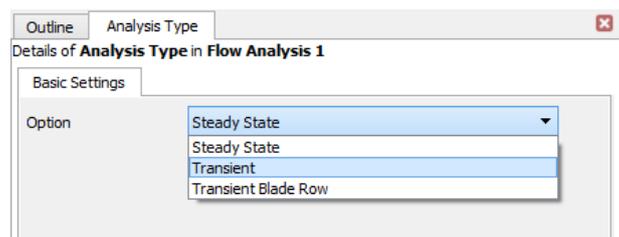


Figura 79. Tipo de análisis transitorio.
Fuente: Elaboración propia.

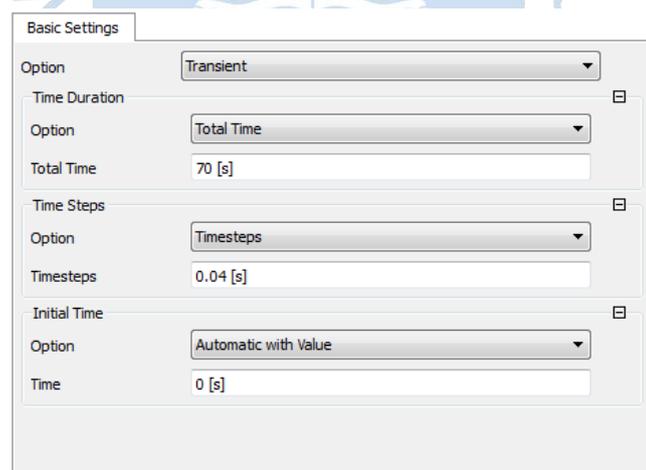


Figura 80. Configuración del análisis transitorio.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 81, se ve el uso de *Initialization*, de uso exclusivo en un análisis transitorio, ya que nos permite definir las condiciones iniciales que tendrá nuestra simulación. Debe activarse con un *check*, se encuentra dentro de las herramientas de *Default Domain*.

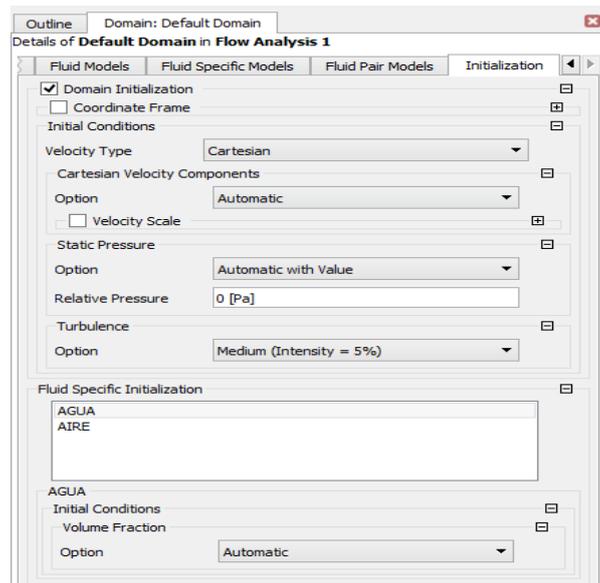


Figura 81. Configuración del *default domain* las condiciones iniciales en análisis transitorio.
Fuente: Elaboración propia.

Como ya se ha visto, con el objetivo de mejorar el tiempo de simulación y la calidad de los resultados se debe configurar las opciones del Control del solucionador o *Solver control*. (Figura 82).

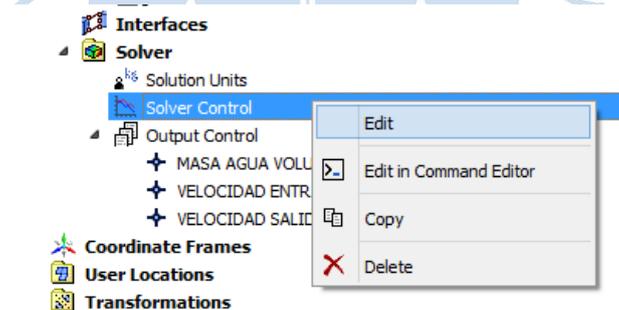


Figura 82. *Solver control*.
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el análisis estacionario, dentro de las opciones del *Solver control*, configuramos el número de iteraciones que tendrá nuestra simulación, el tipo de residuo RMS, la calidad con la que se apreciará la turbulencia en los resultados y en las opciones avanzadas seleccionaremos un control sobre la fracción de volumen de los fluidos, opción *multiphase control*. Estas opciones de configuración se muestran en las Figuras 83 y 84.

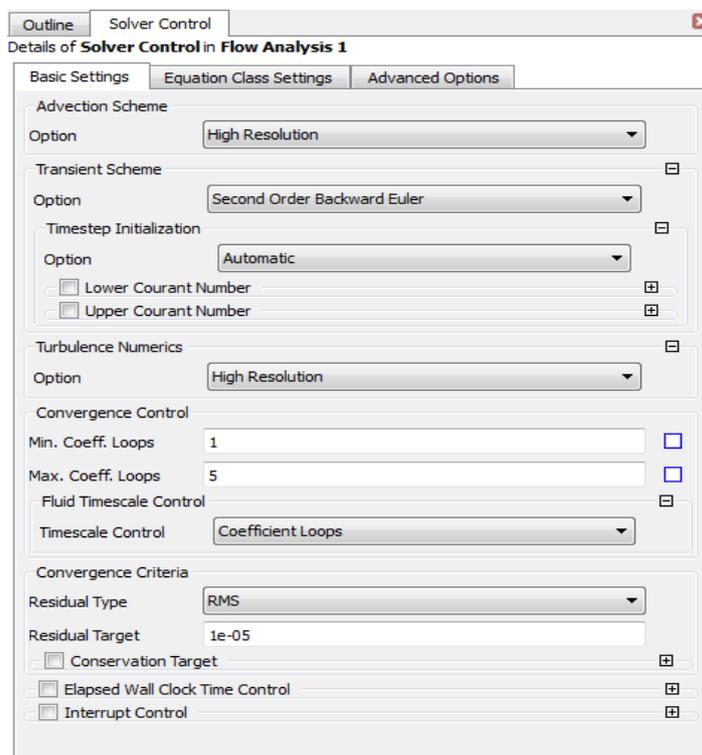


Figura 83. Configuración del *solver control*.
Fuente: Elaboración propia.

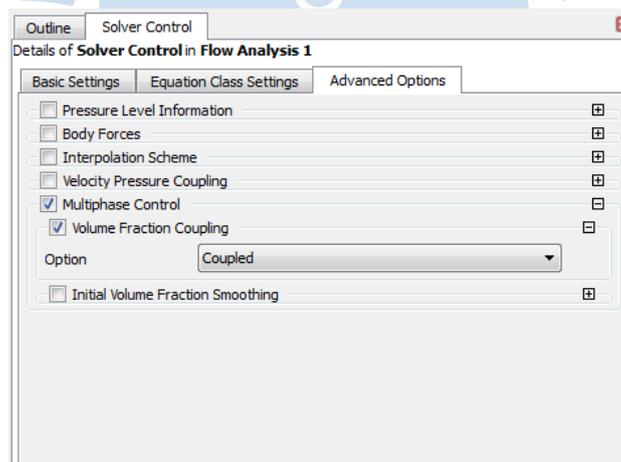


Figura 84. Opciones avanzadas del *solver Control*.
Fuente: Elaboración propia.

La herramienta *Output Control* permite hacer una configuración en la manera como se va a realizar el almacenamiento de datos cuando se realice el proceso de simulación. Esta opción es definida a criterio del usuario, en la opción *Timestep interval*. Como observamos en la Figura 85, se ha escogido un paso de tiempo de 10 segundos para cada guardado, es decir, cada 10 segundos el programa guardará los datos que vaya calculando para luego hacer la representación del flujo en la etapa de post procesamiento. El paso de tiempo será inversamente

proporcional al tiempo que tome Ansys para realizar la simulación, ya que mientras menor sea el paso que escojamos, mayor será el tiempo de finalización del proceso, ya que deberá almacenar más información.

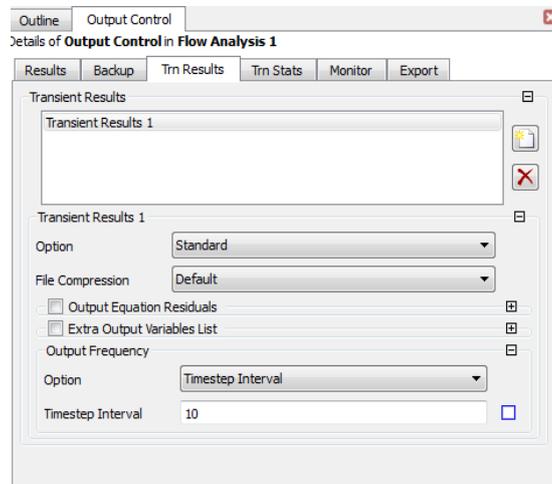


Figura 85. Configuración de *output control* para almacenar datos de la simulación.
Fuente: Elaboración propia.

Los datos que almacena Ansys son observados en la etapa de procesamiento, cuando se encuentra realizando la simulación. En la Figura 86, se puede observar que aparecen en el lado derecho de la pantalla, todos con la extensión “.trn”.

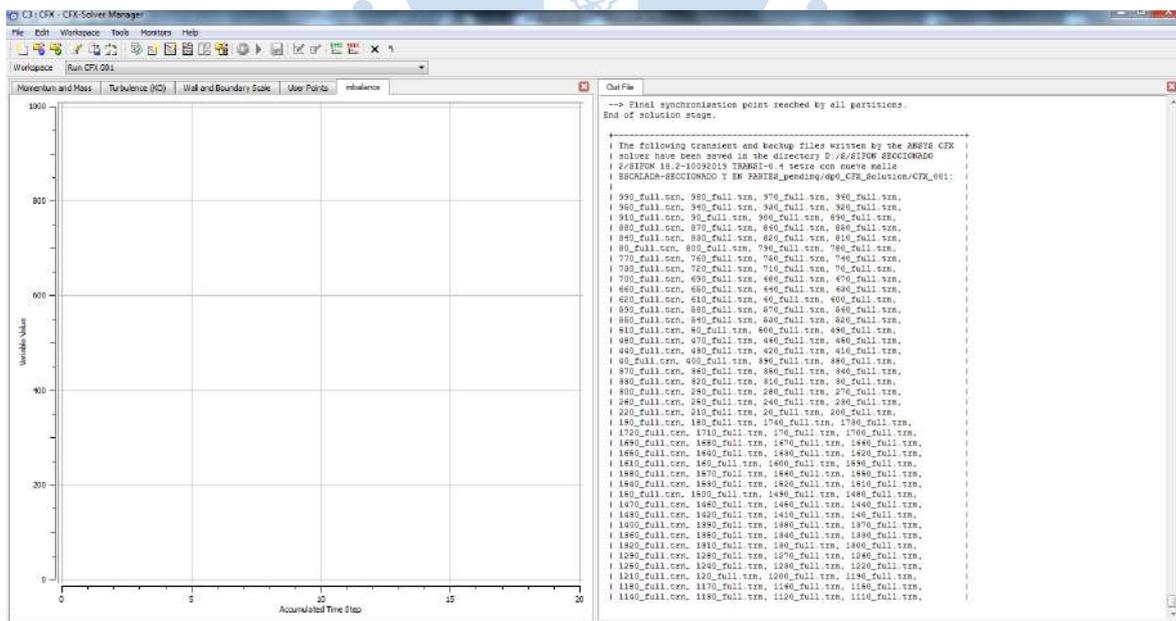


Figura 86. Datos almacenados en la etapa de procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.

Luego de colocar los valores, se cierra la ventana del Setup y automáticamente aparecerá un *check* verde al lado de la opción *Setup*. (Figura 87).



Figura 87. Cumplimiento del *Setup*.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3.3. Configuración de las condiciones de borde

Los siguientes pasos nos permiten crear y asignar a cada una de las zonas de interés o fronteras, las condiciones que requiere el diseño para establecer el comportamiento de la estructura que estamos estudiando.

Hacemos clic derecho sobre la opción *Default Domain*, esta opción abarca todo el contenido del dominio y sobre la cual se puede insertar una región del dominio que queremos definir. Como muestran las Figuras 88 y 89, hacemos clic sobre *Boundary* para establecer las condiciones de la frontera y asignarle un nombre.

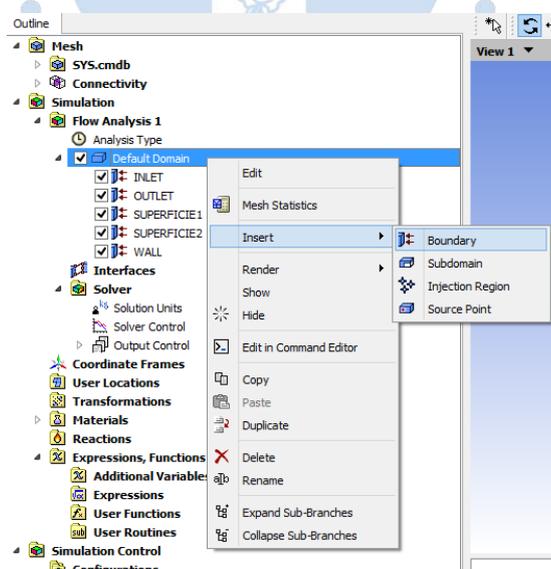


Figura 88. Creación de una frontera o zona de interés.

Fuente: Elaboración propia.

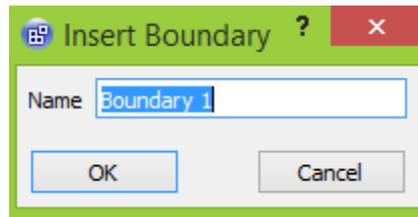


Figura 89. Determinación del nombre de una frontera o zona de interés.

Fuente: Elaboración propia.

A. Entrada o inlet

- Las entradas o *Inlet* como muestra la Figura 90, son para las regiones donde se espera la entrada de flujo, sin embargo, las entradas también pueden ser consideradas salidas cuando se especifica la velocidad. Las entradas de velocidad se destinan para los flujos incompresibles. Entradas de presión y flujo másico son adecuados para los flujos compresibles e incompresibles. El mismo concepto se utiliza para Outlet (Salida).

- Como muestra la Figura 91, el valor del caudal másico es calculado por Ansys en las unidades de kg/s, mientras que en la realidad sabemos que el caudal es calculado en unidades m³/s. Teniendo en cuenta que el agua tiene una densidad de 1kg/L, es decir 1 litro de masa equivale a 1 kg. Entonces 31,807 m³/s sería 31807 kg/s.

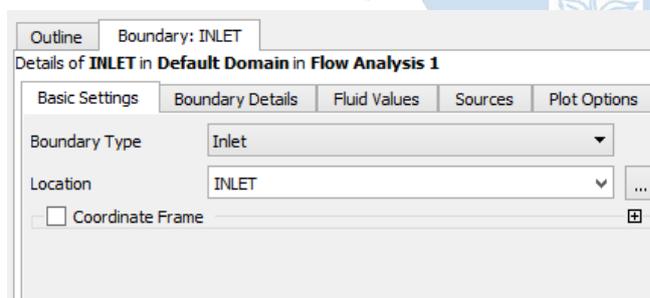


Figura 90. Basic settings de la frontera inlet.

Fuente: Elaboración propia

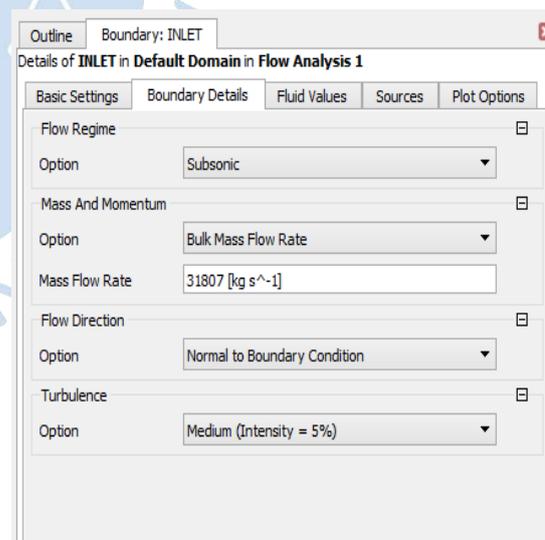


Figura 91. Detalles de la frontera inlet.

Fuente: Elaboración propia.

- La Figura 92 muestra que la fracción de volumen de dos fluidos está representada siempre por 1 y 0. En este caso el valor del agua es 1 y valor de aire es 0.

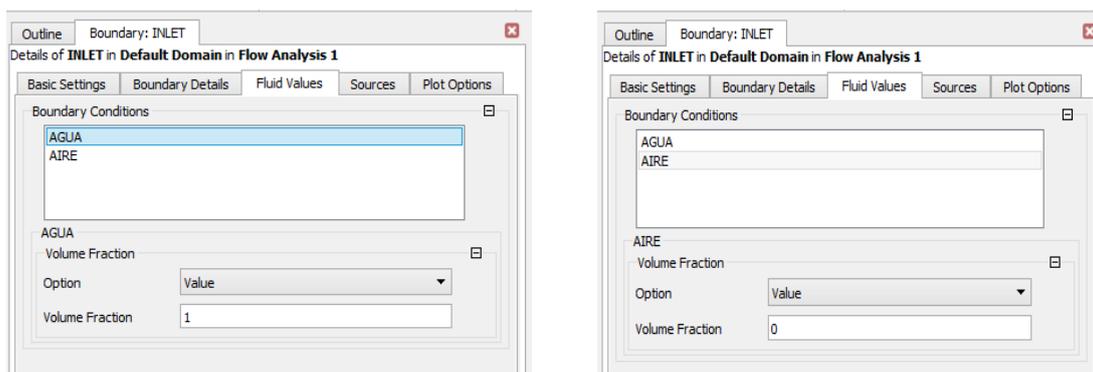


Figura 92. Opción *fluid values* de la frontera *inlet*.
Fuente: Elaboración propia.

- La Tabla 32 muestra el resumen de las condiciones de frontera *inlet*.
- La intensidad de turbulencia 5% (*Medium*) se escoge dependiendo del cálculo intenso de turbulencia en la sección libre.

Tabla 32. Valores de la frontera *inlet*.

Frontera	Condiciones de frontera
Inlet (Entrada)	Masa y momento: Bulk Mass Flow Rate Caudal másico: 31807 kg/s Intensidad de turbulencia: medium 5% Valor de Agua: 1 - Valor de Aire:

Fuente: Elaboración propia.

B. Salida u outlet

- Las salidas u *outlet* como muestra la Figura 93, son para las regiones donde se espera la salida de flujo.
- La Figura 94 detalla que la presión relativa 0 [Pa], está relacionada a la presión atmosférica 1 [atm] del dominio.

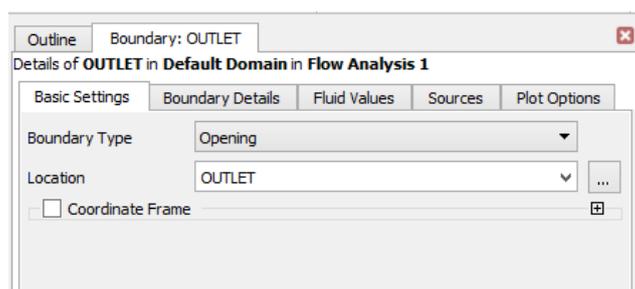


Figura 93. *Basic settings* de la frontera *outlet*.
Fuente: Elaboración propia.

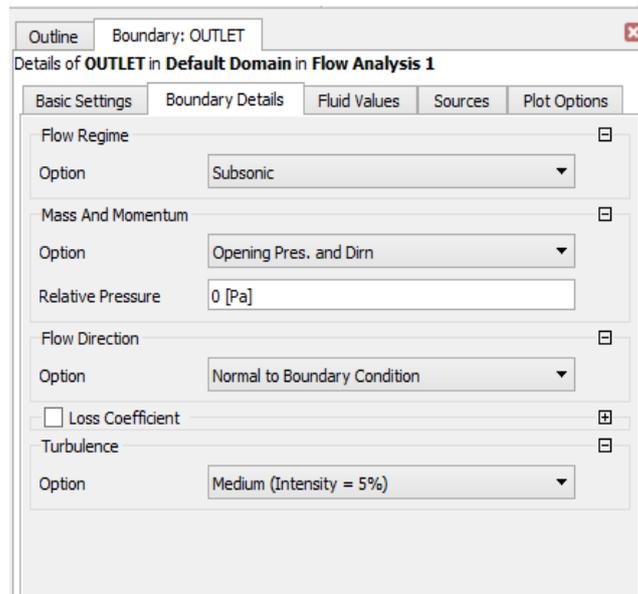


Figura 94. Detalles de la frontera *outlet*.
Fuente: Elaboración propia.

- La Figura 95 muestra que la fracción de volumen de dos fluidos está representada siempre por 1 y 0. En este caso el valor del agua es 0 y valor de Aire es 1.

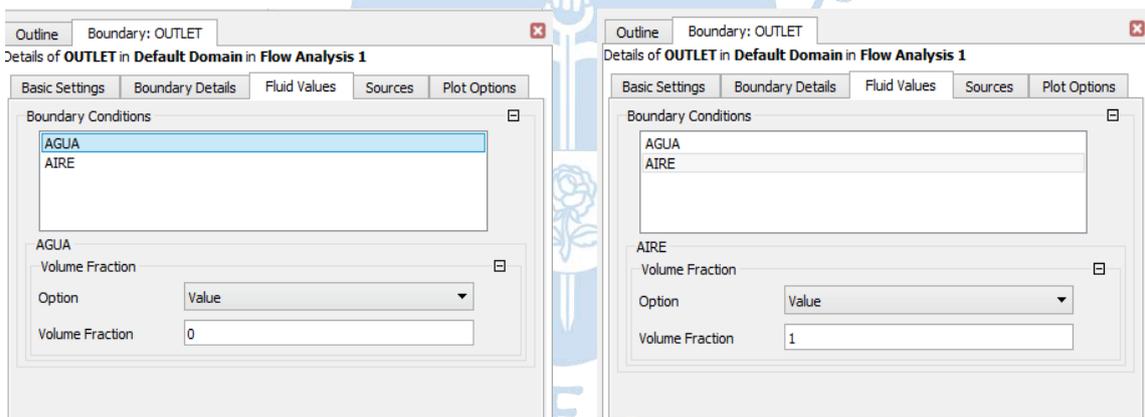


Figura 95. Fluid values de la frontera *outlet*.
Fuente: Elaboración propia.

- La Figura 95 muestra que la fracción de volumen de dos fluidos está representada siempre por 1 y 0. En este caso el valor del agua es 0 y valor de Aire es 1.

- La Tabla 33 muestra el resumen de las condiciones de frontera *outlet*.

- La intensidad de turbulencia 5% (*Medium*) se escoge dependiendo del cálculo intenso de turbulencia en la sección libre.

Tabla 33. Valores de la frontera *outlet*.

Frontera	Condiciones de frontera
Outlet (Salida)	Masa y momento: Opening Pres. and Dirn Presión relativa: 0 Pa Intensidad de turbulencia: medium 5% Valor de Agua: 0 - Valor de Aire: 1

Fuente: Elaboración propia

C. Superficie 1 u opening 1

- La superficie 1 u *opening 1*, son para las regiones donde el agua entra en contacto con el aire, es decir el agua está expuesto a la atmósfera. La configuración de esta frontera se señala en las Figuras 96, 97 y 98.

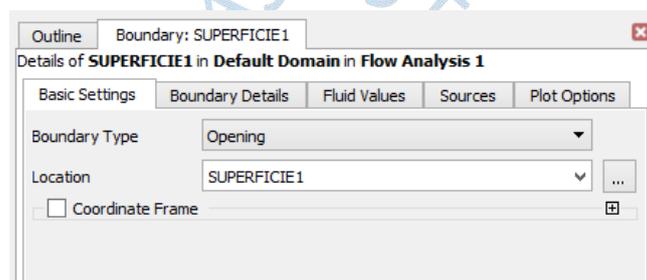


Figura 96. Basic settings de la frontera *opening 1*.

Fuente: Elaboración propia.

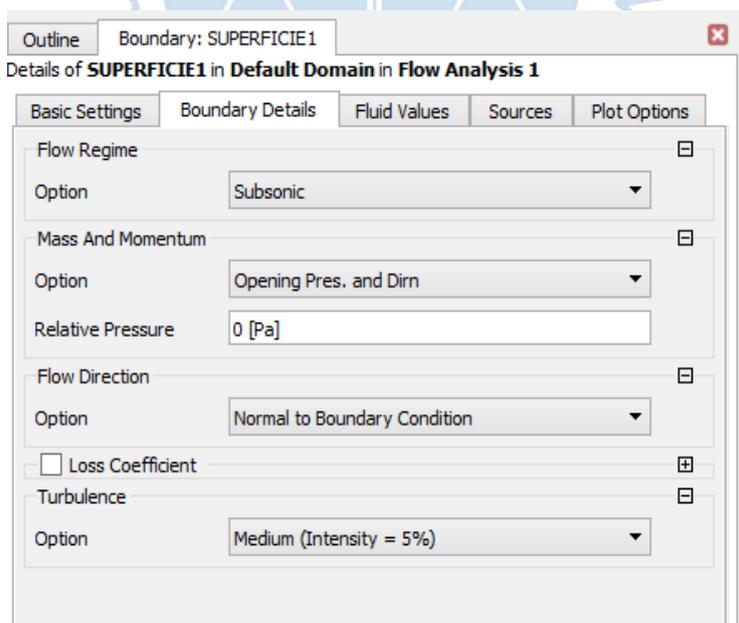


Figura 97. Detalles de la frontera *opening 1*.

Fuente: Elaboración propia.

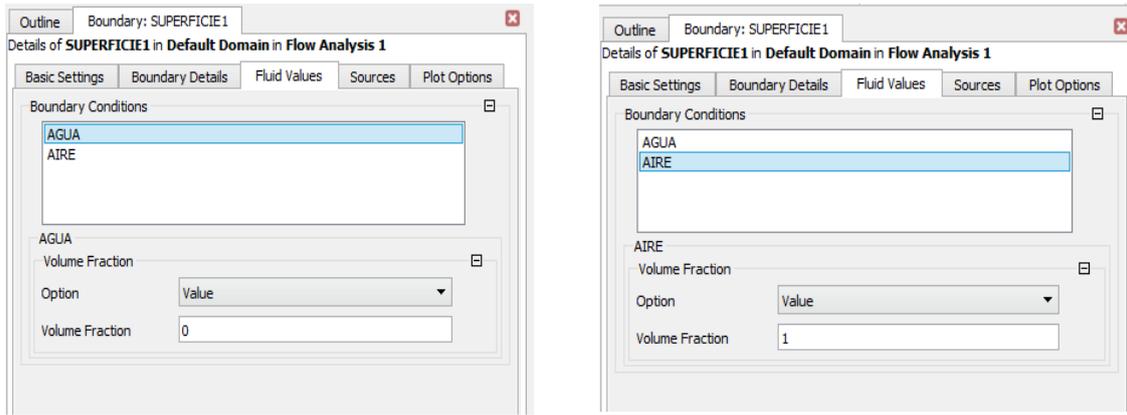


Figura 98. Fluid values de la frontera opening 1.
Fuente: Elaboración propia.

- La Tabla 34 muestra el resumen de las condiciones de frontera opening 1.

Tabla 34. Valores de la frontera opening 1.

Frontera	Condiciones de frontera
Opening (Superficie 1)	Masa y momento: Opening Pres. and Dirn Presión relativa: 0 Pa Intensidad de turbulencia: medium 5% Valor de Agua: 0 - Valor de Aire: 1

Fuente: Elaboración propia

D. Superficie 2 u opening 2

- La superficie 2 u opening 2, son para las regiones donde el agua entra en contacto con el aire, es decir el agua está expuesto a la atmósfera. La configuración de esta frontera se señala en las Figuras 99, 100 y 101.

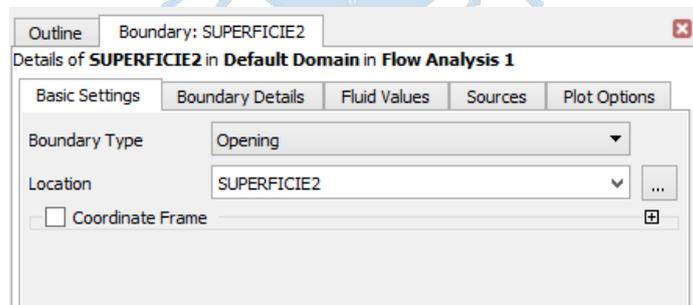


Figura 99. Basic settings de la frontera opening 2.
Fuente: Elaboración propia.

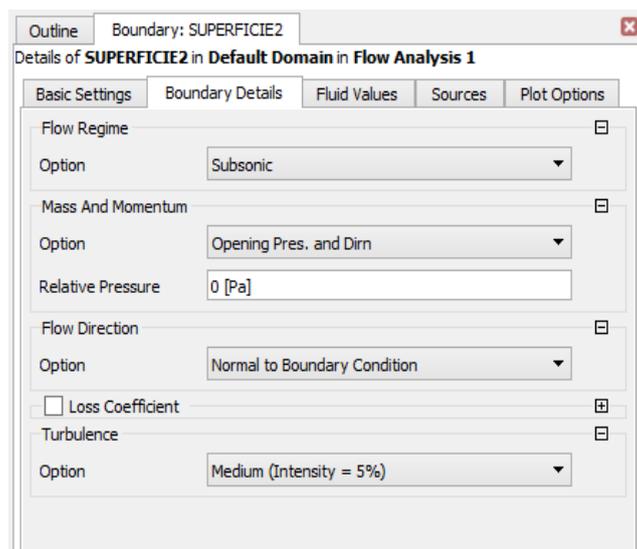


Figura 100. Detalles de la frontera *opening 2*.
Fuente: Elaboración propia.

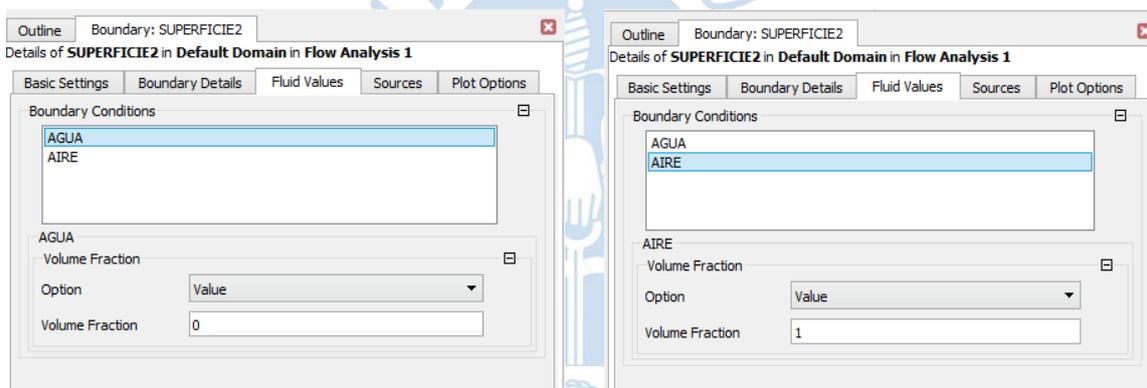


Figura 101. *Fluid values* de la frontera *opening 2*.
Fuente: Elaboración propia.

- La Tabla 35 muestra el resumen de las condiciones de frontera *opening 2*.

Tabla 35. Valores de la frontera *opening 2*.

Frontera	Condiciones de frontera
Opening(Superficie 2)	Masa y momento: Opening Pres. and Dirn Presión relativa: 0 Pa Intensidad de turbulencia: medium 5% Valor de Agua: 0 - Valor de Aire: 1

Fuente: Elaboración propia.

E. Paredes o wall

- Las paredes o *wall* como muestra la Figura 102, son para las regiones limitadas que tendrán contacto con el fluido.

- La opción *No slip wall* otorga a la pared a no tener libre deslizamiento. (Figura 103).

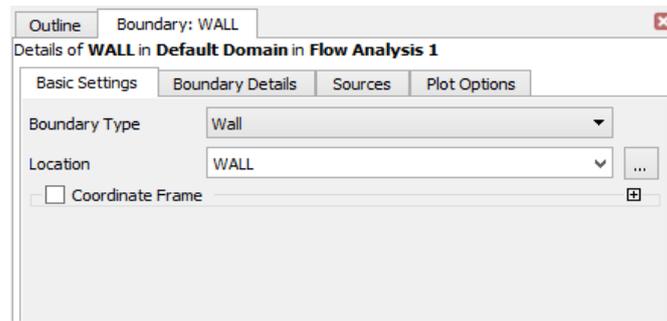


Figura 102. Basic settings de la frontera wall.
Fuente: Elaboración propia.

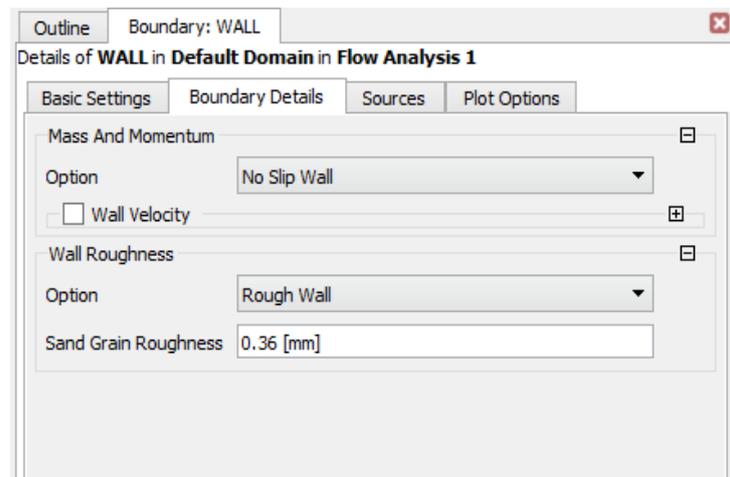


Figura 103. Detalles de la frontera wall.
Fuente: Elaboración propia.

- La Tabla 36 muestra el resumen de las condiciones de frontera wall.
- Hay que tener en cuenta que el coeficiente de rugosidad absoluta (mm) no es igual al coeficiente de rugosidad de Manning, ya que la rugosidad real no posee unidades. Para este caso el material es de concreto simple y según la Tabla 36, el valor de la rugosidad absoluta es 0.36 mm.

Tabla 36. Valores de la frontera wall.

Frontera	Condiciones de frontera
Wall(paredes)	Masa y momento: No Spill Wall Rugosidad de la pared: Rough Wall Rugosidad absoluta 0.36mm

Fuente: Elaboración propia.

6.3. Esquema del proyecto: Procesamiento

En esta parte del capítulo se muestra la secuencia de simulación hasta conseguir la convergencia de las variables en estudio. La función de la celda *Solution*, tiene como objetivo alcanzar la convergencia y estabilidad de los datos. (Figura 104).

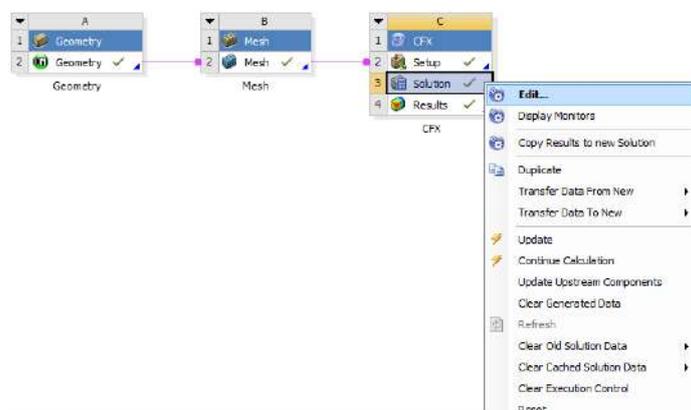


Figura 104. Opciones de la celda *solution*.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 105 nos presenta la ventana *Define Run*, aquí se selecciona la opción *Double Precision* para mayor velocidad y precisión en la obtención de resultados, luego se da inicio al procesamiento haciendo clic en *Start Run*.

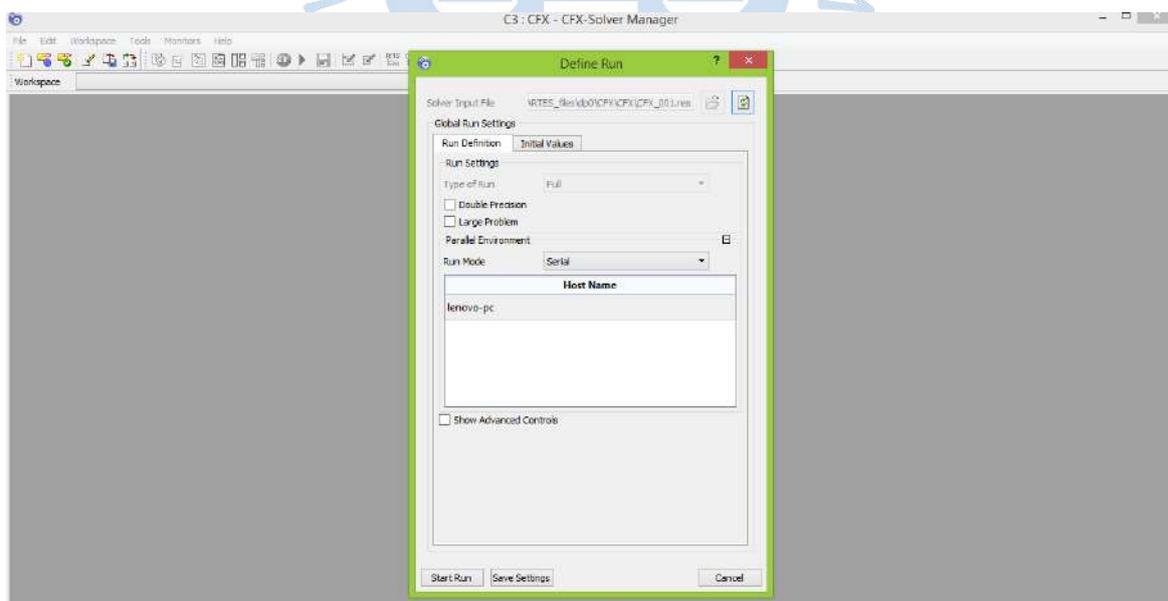


Figura 105. Vista preliminar *solution*.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.1. Criterio de convergencia

Este criterio de convergencia ha sido explicado en capítulos anteriores. Esta parte del procesamiento es automático y su tiempo de duración dependerá de la capacidad computacional del sistema, es decir, mientras sea un sistema de alto rendimiento será menor el tiempo de finalización.

- En un análisis estacionario, el proceso culmina cuando se alcance el número límite de iteraciones asignados por el diseñador, en nuestro caso corresponde a 1500. Sin embargo, el proceso puede culminar antes si es que se consigue llegar a la convergencia antes de la cantidad de iteraciones colocadas y cumpliendo con la cantidad de residuos RMS o MAX. (Figura 106).
- En un análisis transitorio, el proceso culmina cuando haya cumplido también el criterio de convergencia. Sin embargo, el gráfico que relaciona los residuos RMS o MAX, se mostrará de diferente manera. Dado que no fue posible bajar los residuales en el análisis estacionario, se hace uso del análisis transitorio para obtener mejores resultados. Los residuales como se mantendrían durante toda la simulación por debajo de $RMS < 1.0E-05$, con oscilaciones regulares a lo largo del tiempo. Por otro lado, los gráficos de turbulencia (Figura 107), seguimiento de variables escogidos e imbalances; tendrán un comportamiento similar al mostrado en el análisis estacionario.

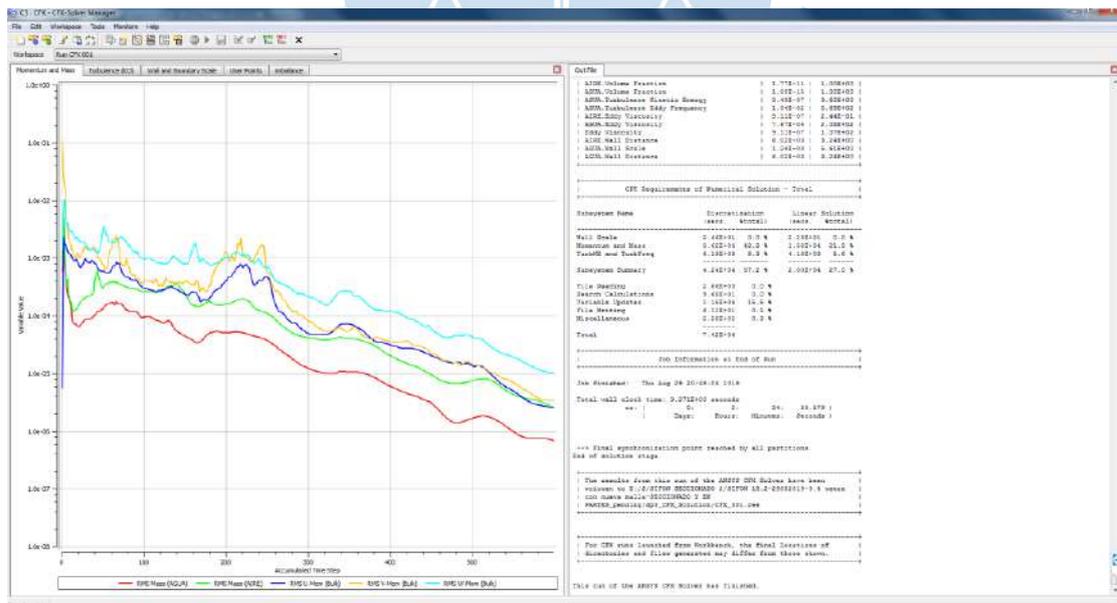


Figura 106. Gráfico de los residuos promedios de los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de conservación de momento y masa.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el criterio de convergencia, exige realizar un seguimiento a las variables que interviene en el análisis de la estructura hasta mantenerse constantes como se ve en la Figura 108, en este caso se evaluó las variables de velocidad y la cantidad de la masa de agua que atraviesa el sifón. Se analiza también los residuos obtenidos de las ecuaciones de imbalances que estudian el comportamiento del fluido. Para esta última evaluación será necesario agregar un nuevo monitor que muestre el gráfico de imbalances, (Figura 109).

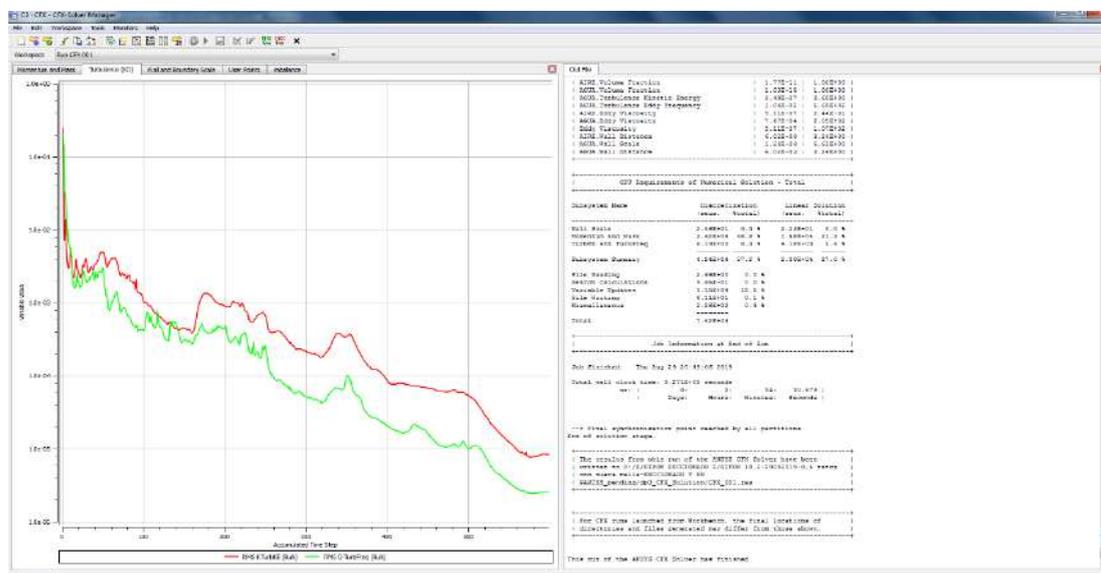


Figura 107. Gráfico de los residuos promedios de los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de turbulencia.

Fuente: Elaboración propia.

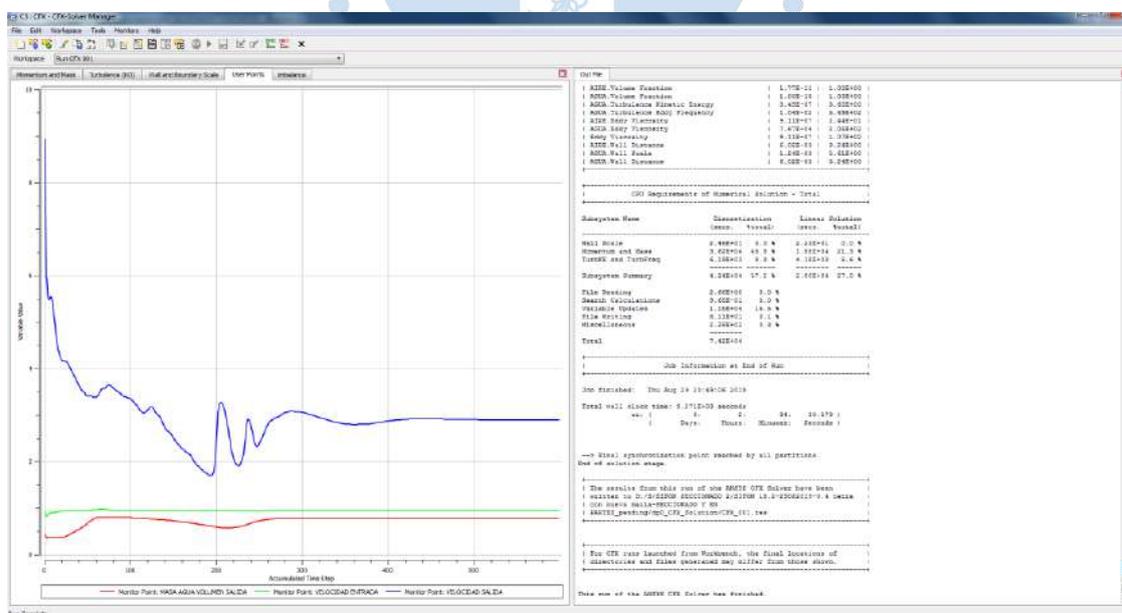


Figura 108. Gráfico de las variables que han sido seleccionadas para su estudio.

Fuente: Elaboración propia.

La pestaña *user points*, nos muestra el seguimiento de las variables que hemos escogido para analizar: velocidad en la entrada y salida del sifón y masa de agua a la salida, esto lo muestran las figuras 110, 111 y 112.

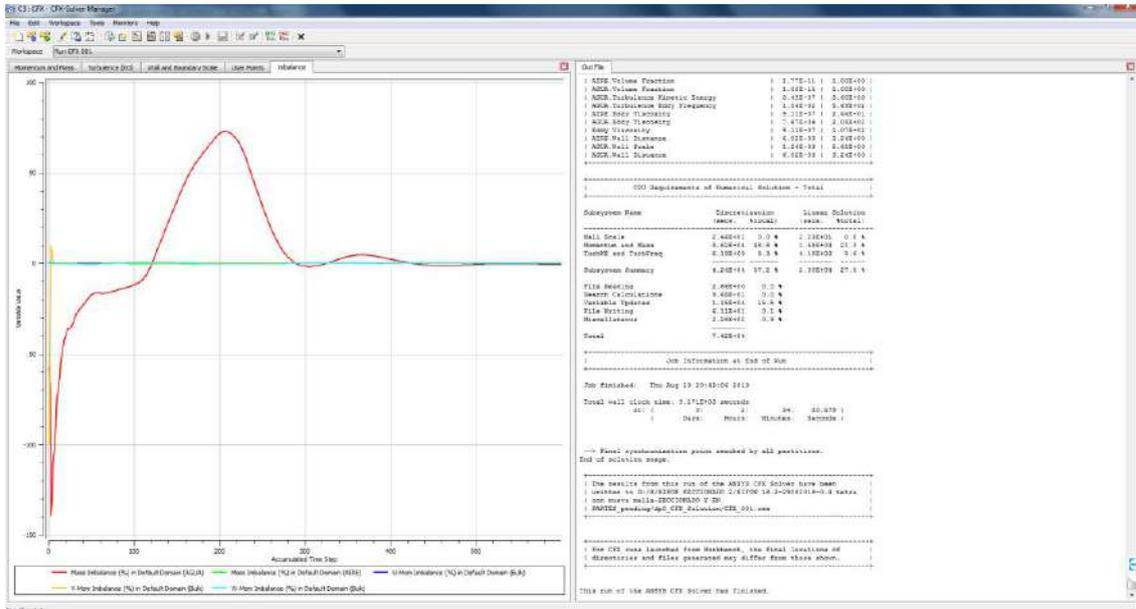


Figura 109. Gráfico de imbalances de las ecuaciones que rigen el comportamiento del fluido.
Fuente: Elaboración propia.

Como ya se ha mencionado, se tendrá que agregar un nuevo monitor para observar el gráfico de imbalances.

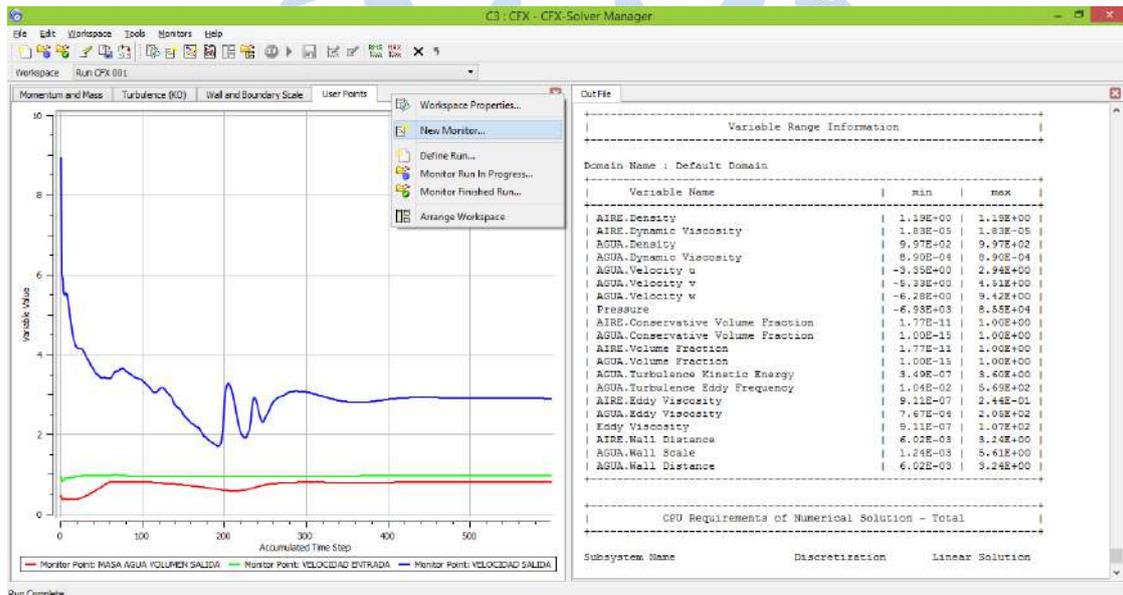


Figura 110. Insertar nuevo monitor para nuevo análisis de residuos.
Fuente: Elaboración propia.

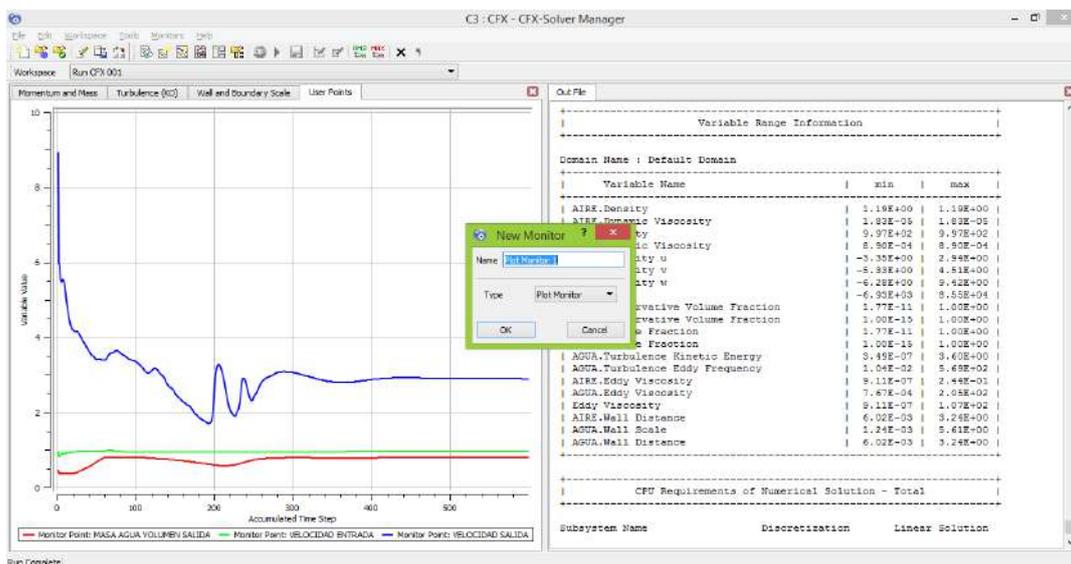


Figura 111. Definir nuevo monitor como *imbalance*.
Fuente: Elaboración propia.

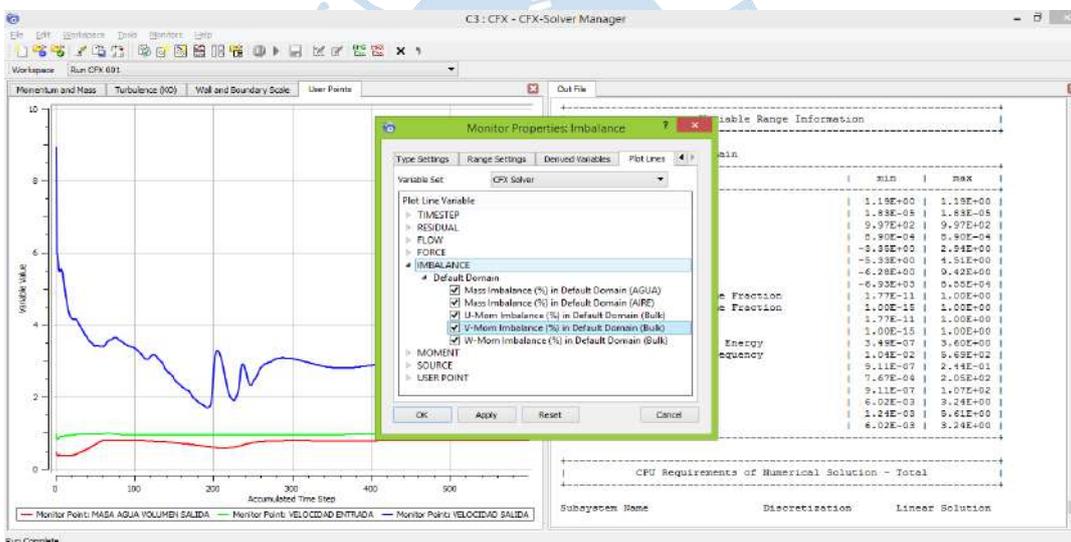


Figura 112. Configuración del nuevo monitor *imbalance*.
Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera que agregamos imbalances, podemos hacer para seguir diferentes parámetros. En este caso, también fue necesario hacer un seguimiento del caudal de agua que ingresa y sale de la estructura, el cual debe cumplir la ley de continuidad. Veamos a continuación los pasos para llegar a su análisis, donde al final observaremos se logra mantener constante el valor del caudal de salida, sin embargo, llama la atención que sea un valor negativo; esto debido al propio funcionamiento del sifón, ya que el flujo de agua durante el proceso llega hasta un punto y retorna hasta lograr llenar la tubería. Finalmente continúa su paso por el canal. Las líneas de corriente de flujo que regresan se consideran como negativas, sin embargo, el valor del caudal se mantiene igual. (Figura 113, 114 y 115).

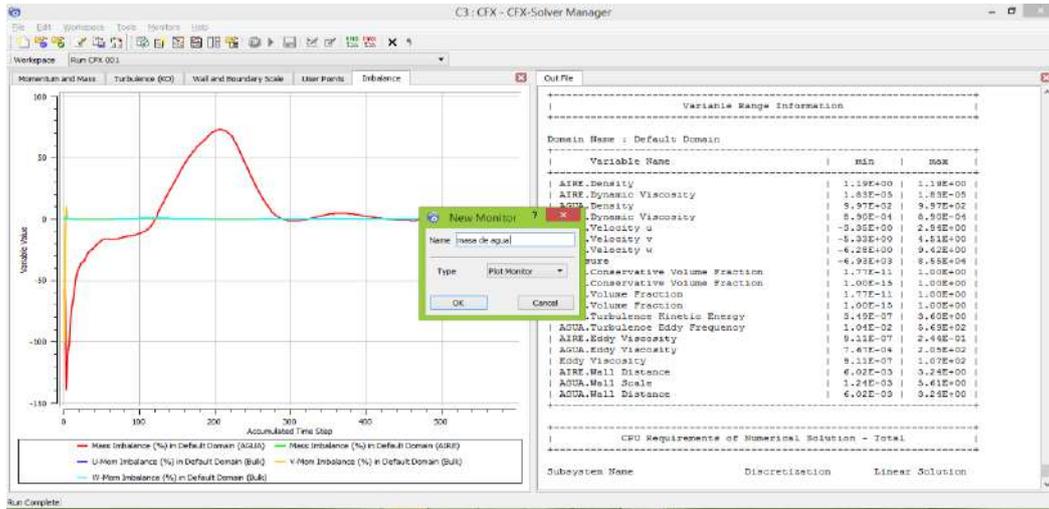


Figura 113. Definir nuevo monitor como masa de agua.
Fuente: Elaboración propia.

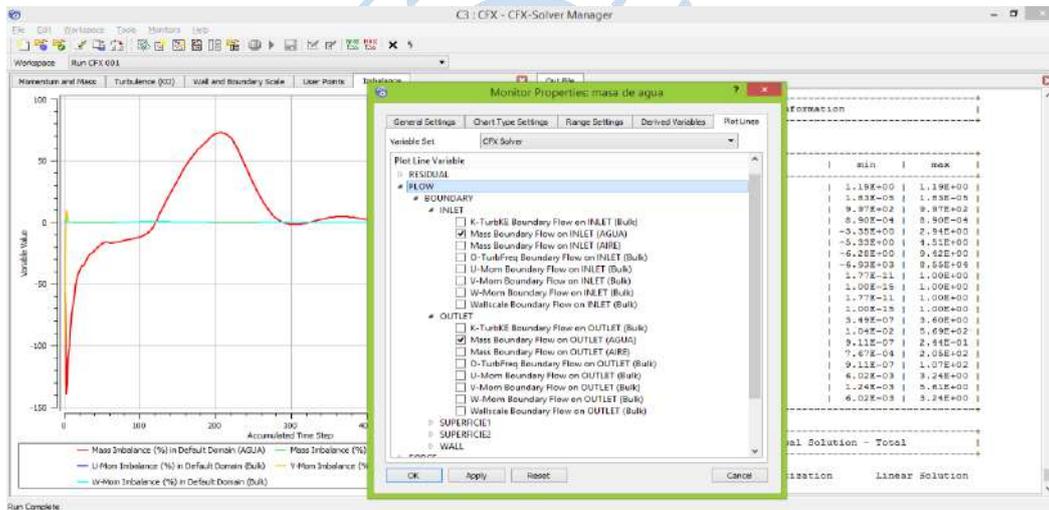


Figura 114. Configuración del nuevo monitor masa de agua.
Fuente: Elaboración propia.

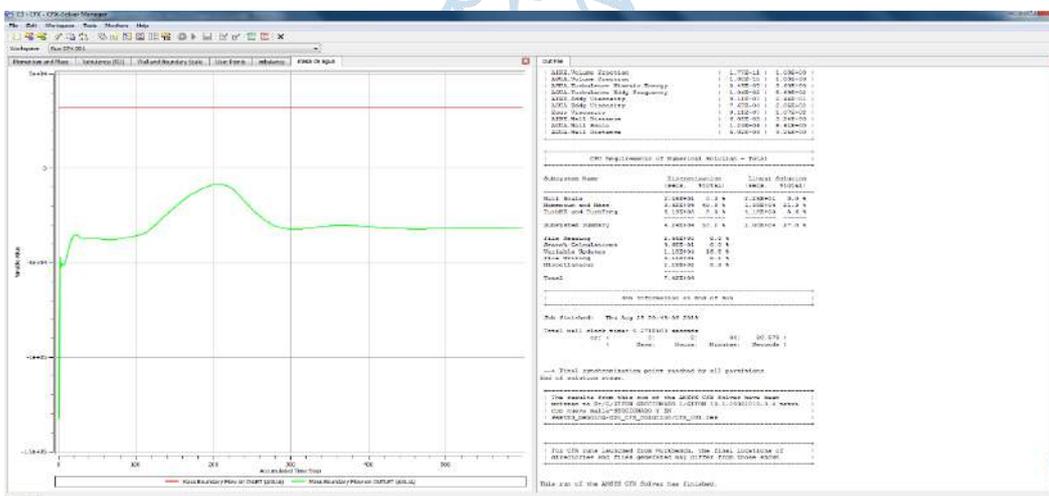


Figura 115. Gráfico que mide la cantidad de caudal que ingresa y sale de la estructura.
Fuente: Elaboración propia.

Finalizado la etapa de procesamiento, la Figura 116 muestra los resultados obtenidos a través de los rangos de valores de las propiedades y características del fluido.

Average Scale Information	
Domain Name : Default Domain	
Global Length	= 2.1181E+01
Minimum Extent	= 1.2480E+01
Maximum Extent	= 4.4670E+02
AIRE.Density	= 1.1850E+00
AIRE.Dynamic Viscosity	= 1.8310E-05
AIRE.Velocity	= 2.7005E+00
AIRE.Advection Time	= 7.8436E+00
AIRE.Reynolds Number	= 3.7019E+06
AIRE.Mass (Conservative)	= 4.4413E+03
AIRE.Mass (Normalised)	= 4.4413E+03
AIRE.Volume	= 3.7479E+03
AIRE.Volume Fraction	= 3.9439E-01
AGUA.Density	= 9.9700E+02
AGUA.Dynamic Viscosity	= 8.8990E-04
AGUA.Velocity	= 2.7005E+00
AGUA.Advection Time	= 7.8436E+00
AGUA.Reynolds Number	= 6.4085E+07
AGUA.Mass (Conservative)	= 5.7380E+06
AGUA.Mass (Normalised)	= 5.7380E+06
AGUA.Volume	= 5.7552E+03
AGUA.Volume Fraction	= 6.0561E-01
Wave Speed	= 1.4415E+01
Froude Number	= 1.8734E-01

Variable Range Information		
Domain Name : Default Domain		
Variable Name	min	max
AIRE.Density	1.19E+00	1.19E+00
AIRE.Dynamic Viscosity	1.83E-05	1.83E-05
AGUA.Density	9.97E+02	9.97E+02
AGUA.Dynamic Viscosity	8.90E-04	8.90E-04
AGUA.Velocity u	-3.35E+00	2.94E+00
AGUA.Velocity v	-5.33E+00	4.51E+00
AGUA.Velocity w	-6.28E+00	9.42E+00
AIRE.Eddy Viscosity	-6.93E+03	9.55E+04
AIRE.Conservative Volume Fraction	1.77E-11	1.00E+00
AGUA.Conservative Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
AIRE.Volume Fraction	1.77E-11	1.00E+00
AGUA.Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
AGUA.Turbulence Kinetic Energy	3.49E-07	3.60E+00
AGUA.Turbulence Eddy Frequency	1.04E-02	5.69E+02
AIRE.Eddy Viscosity	9.11E-07	2.44E-01
AGUA.Eddy Viscosity	7.67E-04	2.05E+02
Eddy Viscosity	9.11E-07	1.07E+02
AIRE.Wall Distance	6.02E-03	3.24E+00
AGUA.Wall Scale	1.24E-03	5.61E+00
AGUA.Wall Distance	6.02E-03	3.24E+00

Figura 116. Características y propiedades del fluido mostradas en la finalización de la simulación.

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Esquema del proyecto: Postprocesamiento

6.4.1. Resultados de la simulación

Entre las variables de interés evaluadas en la presente investigación tenemos: velocidad, presión, tirante que será medido por medio de las fracciones de volumen y para una mayor visualización, la trayectoria de las líneas de corriente que atraviesa el sifón. El siguiente paso nos ayudará a obtener los resultados del programa Ansys CFX para su análisis e interpretación, el cual servirá para la comparación entre las diferentes alternativas de solución planteadas. Como se ve en la Figura 117 y 118, ingresamos a la ventana de resultados haciendo un clic derecho en la opción *Results* del módulo, seguido de la selección de la opción *Edit*.

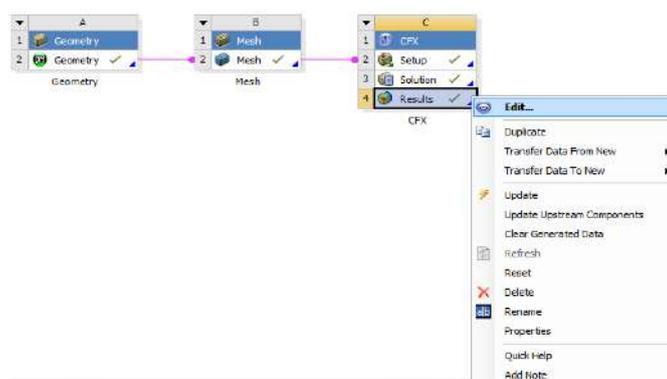


Figura 117. Opciones de la celda *results*.

Fuente: Elaboración propia.

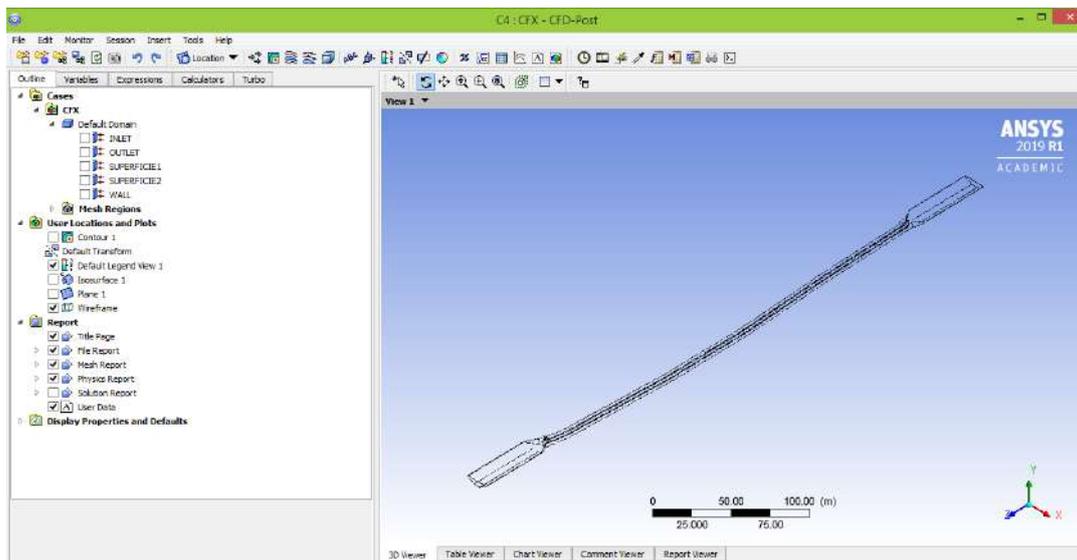


Figura 118. Visualización de la celda *results*, donde se puede analizar las variables.
Fuente: Elaboración propia.

6.4.1.1. Velocidades de flujo

Con el fin de analizar el comportamiento hidráulico del sifón, la etapa de postprocesamiento posee elementos que nos ayudarán a conocer variables como la velocidad del fluido que atraviesa el sistema.

Es esencial contar con los vectores de velocidad para mostrar la dirección y magnitud de la velocidad en cada punto del sifón y detectar los flujos, remolinos o arrastre de sedimentos. La distribución de velocidades es compleja en el instante en que el flujo empieza a llenar las tuberías, ya que la dirección con la que ingresa se vuelve en contra por acción de la gravedad hasta el momento en que logra salir de la estructura hacia el canal.

En la Figura 119, se muestra que el fluido empieza acelerarse en la estructura de entrada al sifón por la reducción de la sección. Transcurrido un tiempo el tubo se llena y el flujo en la salida presenta su mayor velocidad de aproximadamente 6.2 m/s y una velocidad promedio de 4 m/s en la tubería; esto luego de que la tubería del sifón se encuentre totalmente lleno y con un flujo constante trabajando a presión. El comportamiento del flujo puede considerarse como laminar y turbulento y podrá ser representada por medio de un perfil de velocidades, en un punto del sifón.

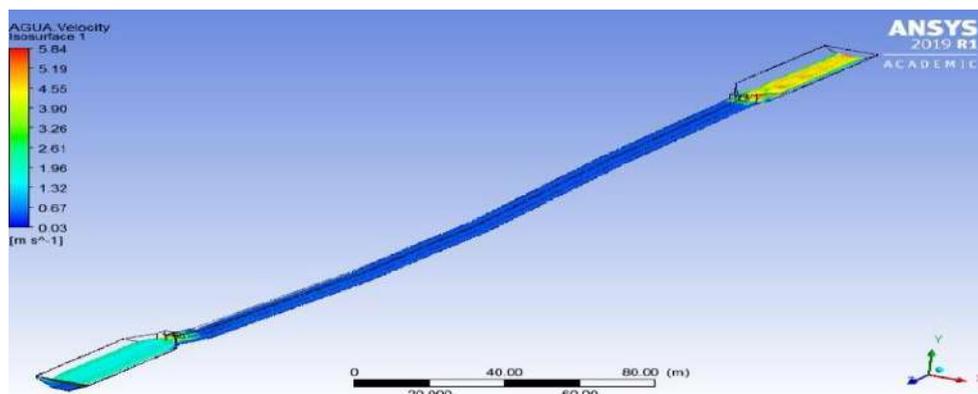


Figura 119. Distribución de velocidades en el sifón para un $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$.
Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 120, 121 y 122 se muestra un análisis de los perfiles de velocidad en tres puntos del sifón y los resultados se muestran en los gráficos de la derecha. Teóricamente, el perfil de velocidad en la entrada del sifón representa un flujo turbulento, mientras que el perfil de velocidad en el centro y a la salida del sifón representa un flujo laminar; al mismo tiempo tendremos un valor de velocidad para una altura determinada.

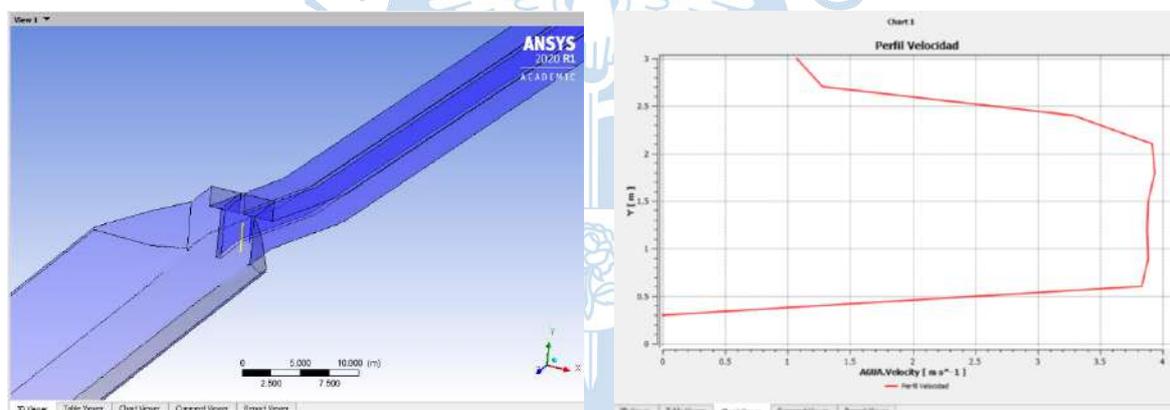


Figura 120. Perfil de elevación vs velocidad del flujo en la entrada del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

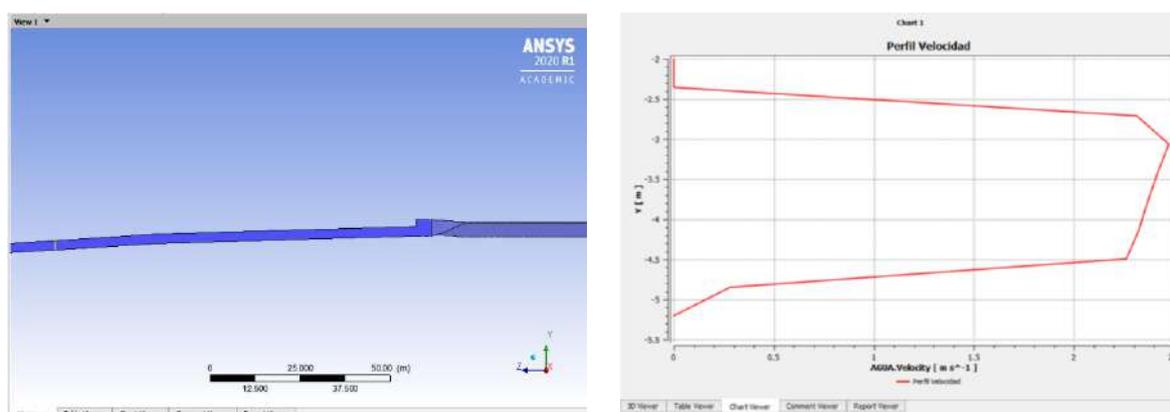


Figura 121. Perfil de elevación vs velocidad del flujo en el interior del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

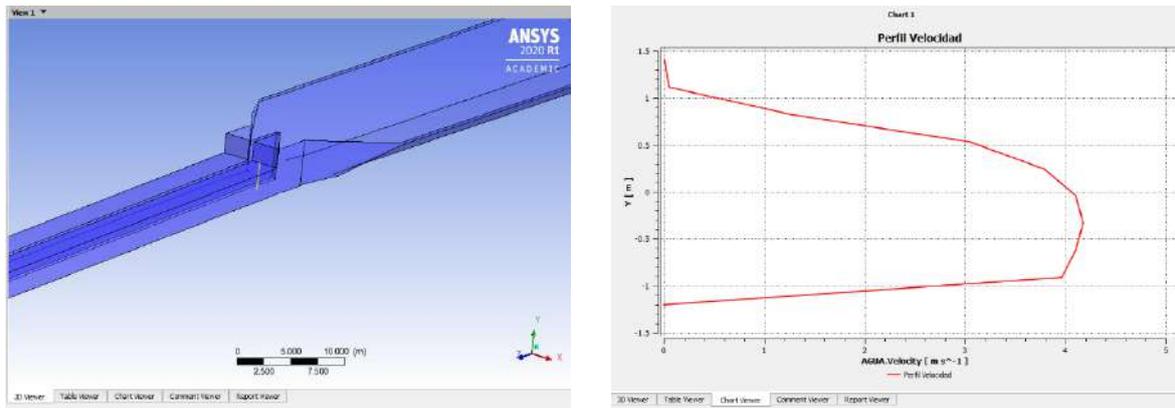


Figura 122. Perfil de elevación vs velocidad del flujo en la salida del sifón.

Fuente: Elaboración propia.

Otra de las características que ANSYS CFX nos muestra en sus resultados, es poder representar una variable con un único valor a lo largo de la estructura en análisis. En la Figura 123, se muestra las zonas en el interior de la estructura donde la velocidad es 1.5 m/s.

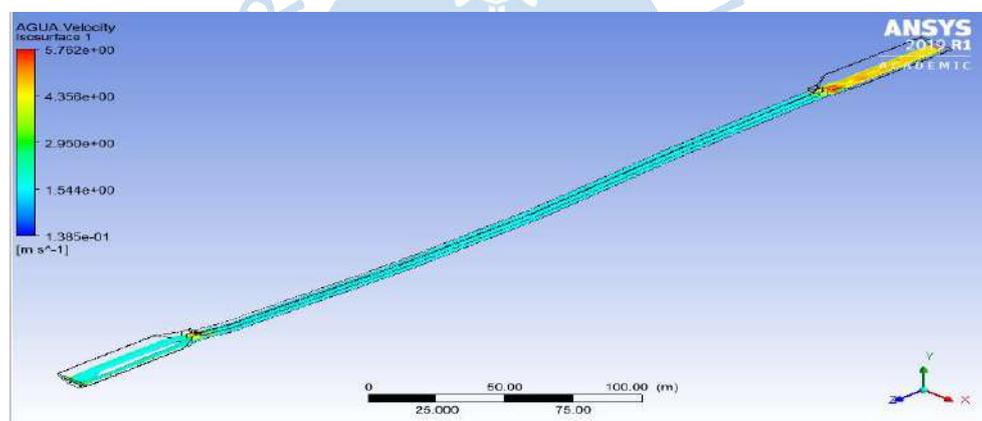


Figura 123. Distribución de velocidades con valor de 1.5 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

6.4.1.2. Presiones

La distribución de presiones tiene relación con el principio fundamental de la hidrostática, la cual establece que, para un punto cualquiera por debajo la superficie libre del agua, la presión será directamente proporcional a su densidad, es decir la presión cambiará según la profundidad de flujo, esto se puede reflejar en la Figura 124.

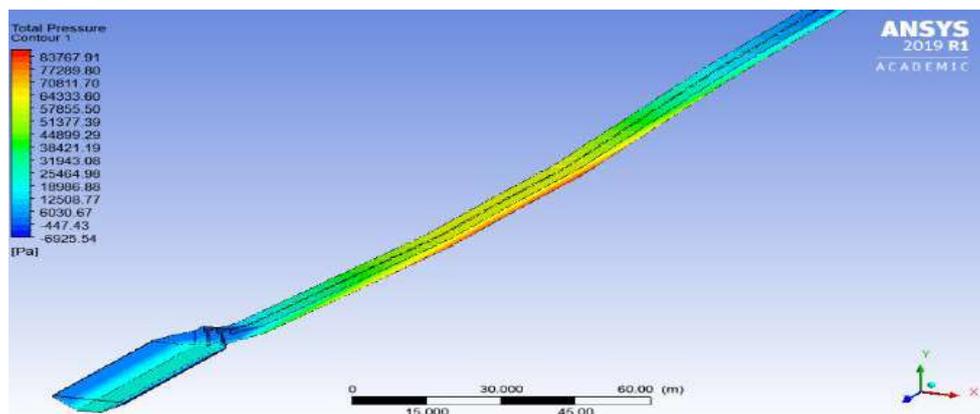


Figura 124. Distribución de presiones en el sifón para un $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$.
Fuente: Elaboración propia.

En las zonas con presencia de curvaturas o turbulencias originadas por el cambio en la sección del canal como en la entrada y salida del sifón, hace que la distribución de presiones no sea totalmente vertical. Además, en el punto más bajo de la estructura se mostrará presiones mucho mayores causado por el aumento de la velocidad y a la existencia de turbulencia.

Cabe indicar también que la presión total se reducirá considerablemente debido a la disminución del tirante de agua. En las Figuras 125, 126, 127 y 128, podemos ver cómo será la distribución de presiones para diferentes puntos en el interior del sifón, pudiendo encontrar los valores de las presiones para los puntos definidos en las figuras.

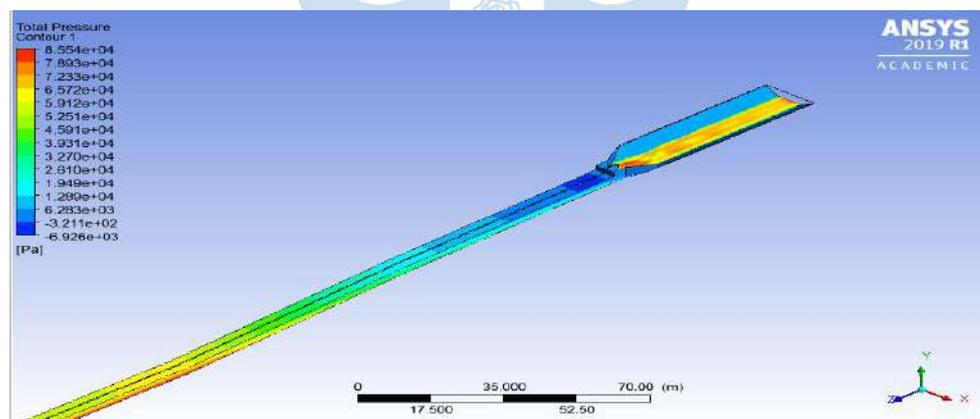


Figura 125. Distribución de presiones a la salida del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

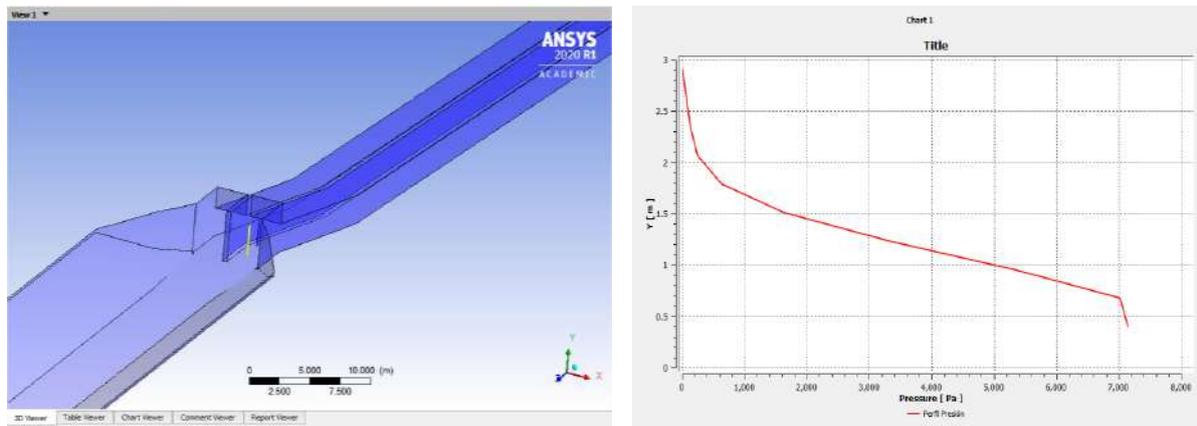


Figura 126. Perfil de elevación vs presión en la entrada del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

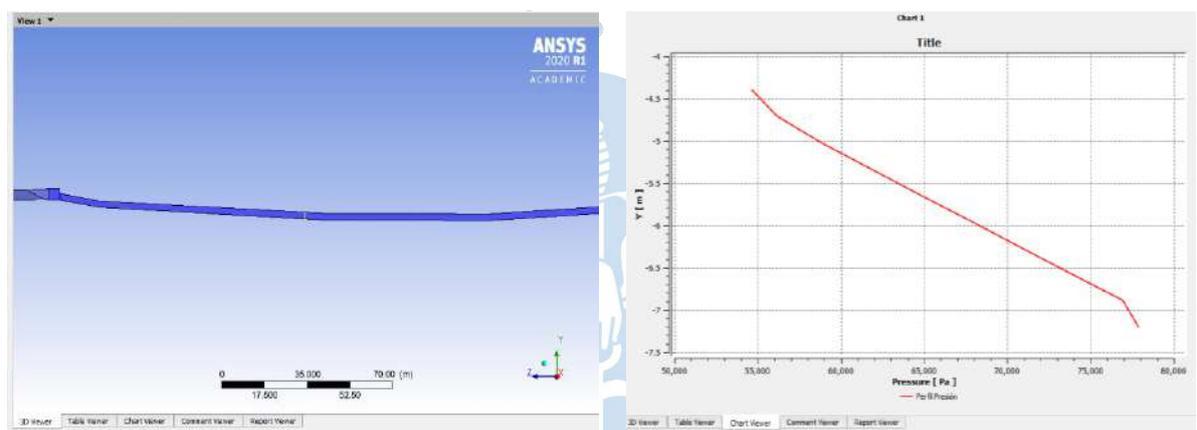


Figura 127. Perfil de elevación vs presión en el interior del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

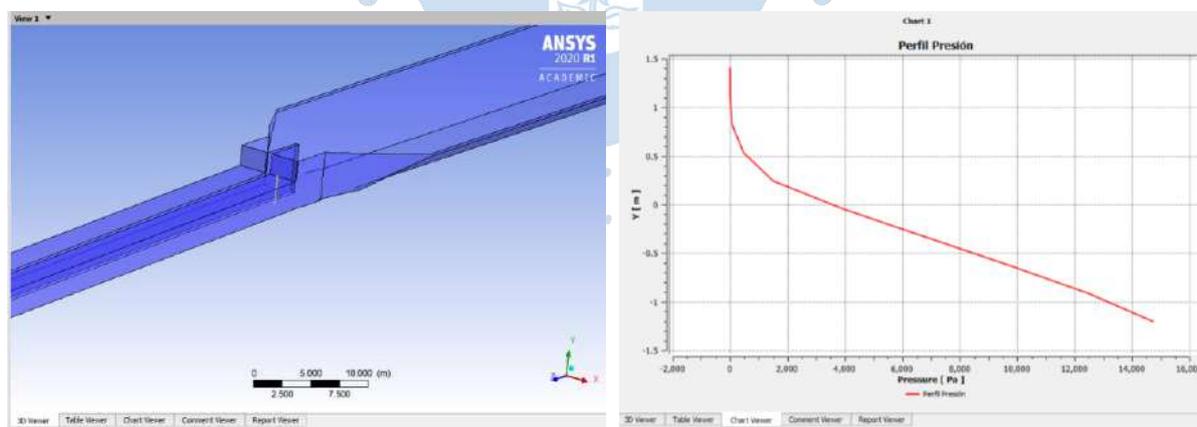


Figura 128. Perfil de elevación vs presión en la salida del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

6.4.1.3. Líneas de corriente

La Figura 129 muestra claramente que aguas arriba en el canal, las líneas de flujo son paralelas, uniforme y estables entre sí ya que su geometría de forma prismática no posee

obstáculos. Cuando se presentan obstáculos cambian de forma las líneas de corriente y son desordenadas.

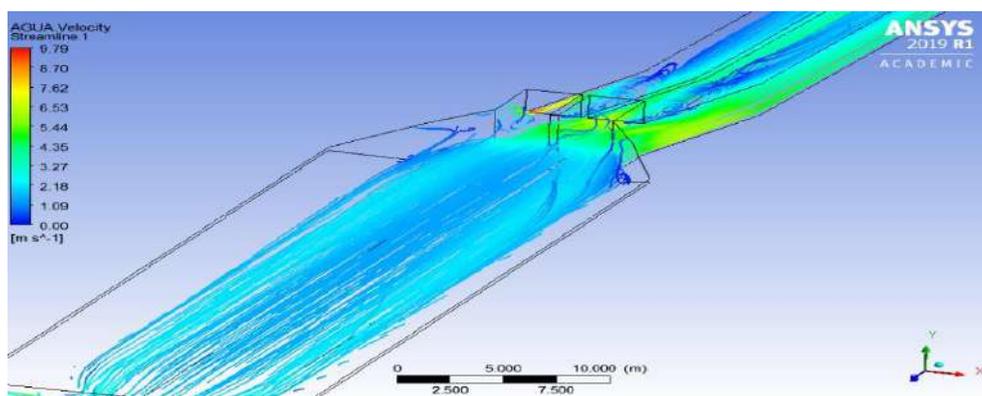


Figura 129. Líneas de corriente a la entrada del sifón.

Fuente: Elaboración propia.

En la transición de entrada al sifón donde las líneas de corriente se agrupan y se empiezan a entrelazar, el flujo se hace más irregular e impredecible. Las partículas de flujo se mueven desordenadamente y en su trayectoria se forman pequeños remolinos, a causa del diseño que tiene la estructura de transición. Paso siguiente, se presentan velocidades mayores sobre la estructura de entrada del sifón y por efecto de la gravedad descende.

La descripción de las líneas de corriente en el cuerpo del sifón muestra líneas de corriente paralelas, con una misma dirección. Finalmente, el cambio de geometría presente en la transición de salida del sifón muestra líneas de corriente con el mismo comportamiento observado en la transición de entrada del sifón.

6.4.1.4. Fracción de volumen

Se realizó el modelado de la mezcla de flujo: agua y aire. Con un tamaño de malla de 0.4 escogido por los buenos resultados que muestra el análisis hecho sobre la misma, además utilizando el modelo de turbulencia SST; se determinó la fracción de volumen que contiene el 100% de agua en el interior del sifón (tubería llena) como se observan en los perfiles de volumen, y lograr determinar las alturas del tirante de agua en una zona específica del canal y del sifón.

Para un caudal másico de $31.807 \text{ m}^3/\text{s}$ que se representa anteriormente en la Figura 122, se tiene un tirante de agua de 2.43 m medido desde el fondo del canal, un valor aproximado al

encontrado en los ensayos de campo medido con correntómetro. Este valor nos da la seguridad de poder seguir obteniendo más medidas de tirante de agua a lo largo de la estructura.

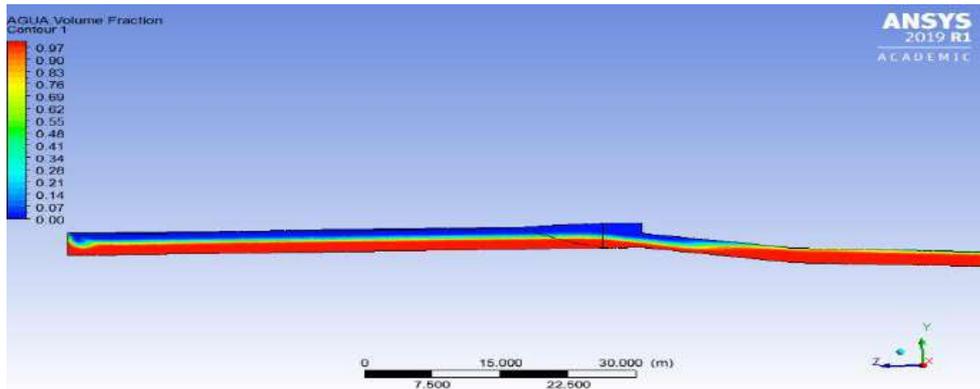


Figura 130. Perfil de fracción de volumen para un $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$ aguas arriba del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

Además, en el estudio del comportamiento del fluido se ha utilizado los perfiles de la variable fracción de volumen, esto podemos ver en las Figuras 130, 131, 132 y 133. Este tipo de variable, permite al diseñador visualizar la interacción de agua-aire, así como el porcentaje de concentración de agua y aire.

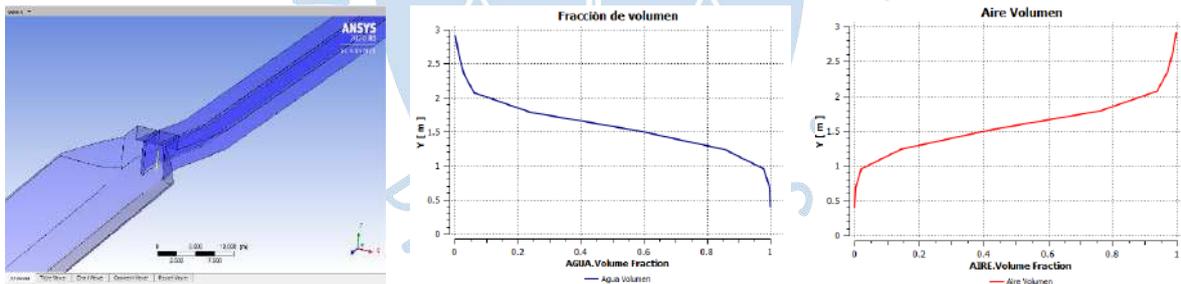


Figura 131. Perfil de elevación vs fracción de volumen en la entrada del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

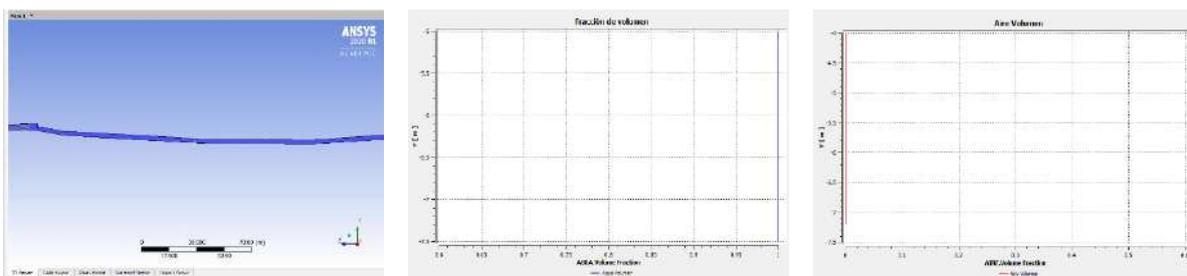


Figura 132. Perfil de elevación vs fracción de volumen en el interior del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

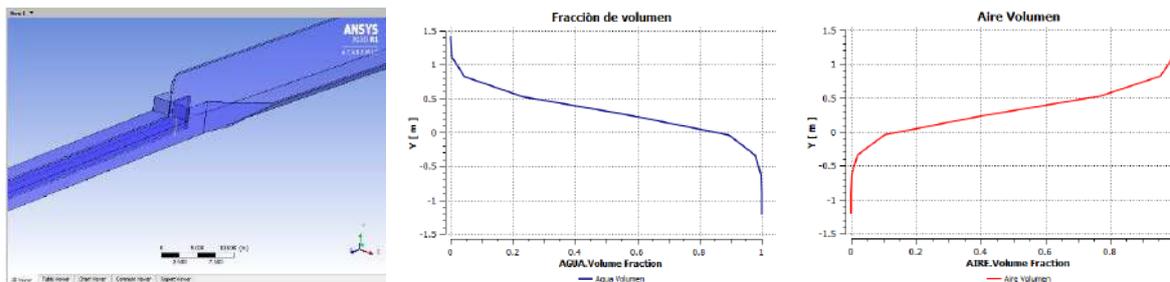


Figura 133. Perfil de elevación vs fracción de volumen en la salida del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

6.4.2 Animación de la simulación

• Análisis estacionario

Para elaborar una animación en un análisis de tipo estacionario, simplemente utilizamos los elementos creados como: *Streamline*, *isosurface*, *planes*, *line*, etc.

- En la Figura 134 se ve la ubicación para la selección de la herramienta de animación.



Figura 134. Herramienta animación.
Fuente: Elaboración propia.

- Dentro de la configuración de la animación, encontraremos la variable o variables que se ha aplicado sobre la estructura en análisis, en el caso de la Figura 135, se analizó las líneas de flujo o *streamline*, con una velocidad de animación media. Es posible grabar la animación activando la casilla *save movie*.



Figura 135. Configuración de la herramienta animación.

Fuente: Elaboración propia.

- Dentro de las configuraciones de la animación, tenemos la casilla *option* como se ve en la Figura 136, en el cual podemos modificar el espacio, el tamaño y el tipo de símbolo de la variable que se está analizando. También podemos seleccionar el tipo de formato y el tamaño para las imágenes con el que se hará la simulación.

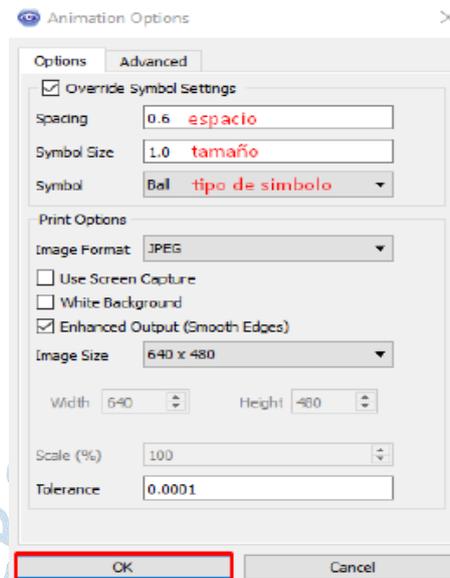


Figura 136. Opciones avanzadas de la animación.
Fuente: Elaboración propia.

- **Análisis transitorio**

Para elaborar una animación en un análisis de tipo transitorio, se selecciona la opción *Timestep Animation* de la herramienta Animación. Realizamos los siguientes pasos:

- En la Figura 137 se ve la ubicación para la selección de la herramienta de animación.



Figura 137. Herramienta animación.
Fuente: Elaboración propia.

- La Figura 138 se ve que, dentro de la configuración de la animación, a diferencia del análisis estacionario, la animación se configurará por pasos de tiempo o *timestep*, con una línea de tiempo donde pueden ver pasos de tiempo desde 0 s hasta 1750 s, para este caso. El paso de tiempo fue configurado previamente en la celda *setup* del interfaz *workbench*.

- El selector de pasos de tiempo, Figura 139, nos muestra los pasos de tiempo que representan el movimiento del fluido a través de la estructura. Las opciones avanzadas en la configuración de la animación se ven en las Figuras 140 y 141.

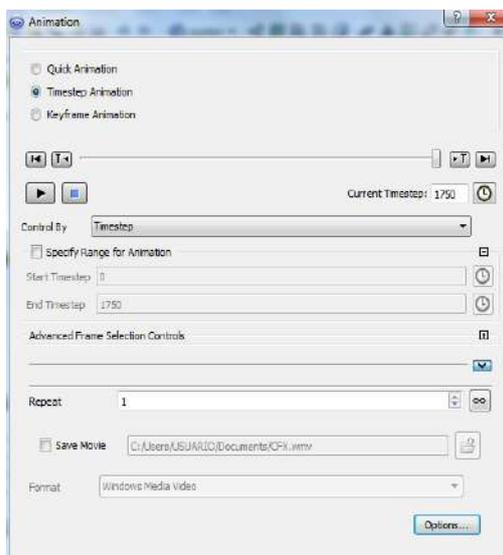


Figura 138. Herramienta animación.
Fuente: Elaboración propia.

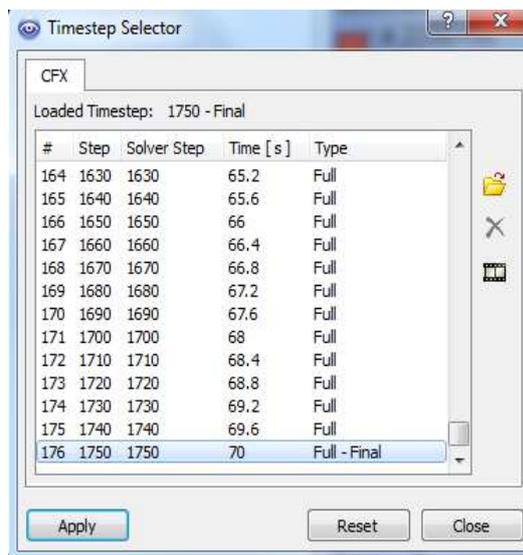


Figura 139. Timestep selector de la herramienta animación.
Fuente: Elaboración propia.

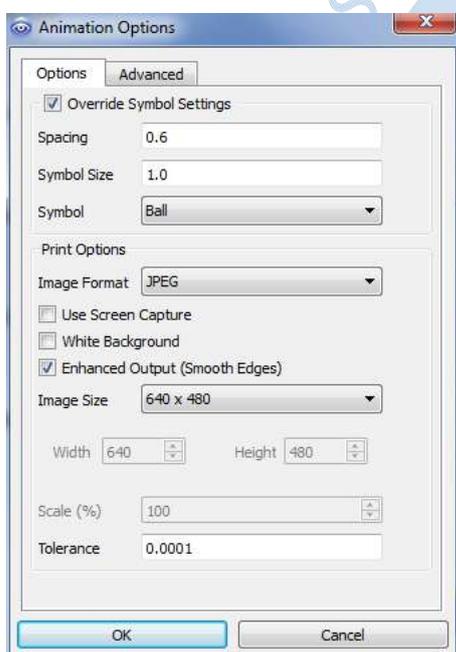


Figura 140. Opciones de la animación.
Fuente: Elaboración propia.

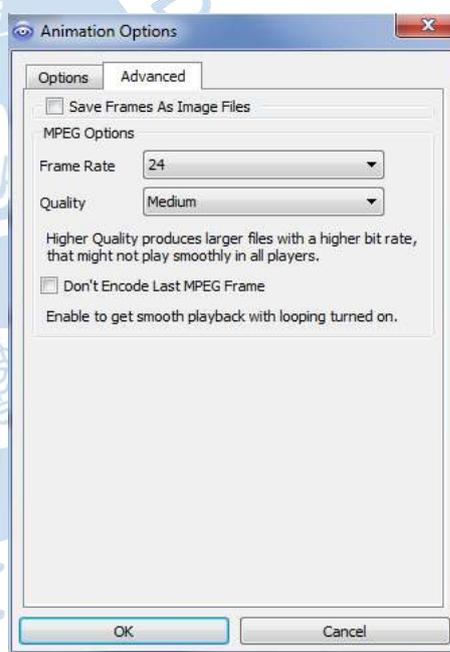


Figura 141. Opciones avanzadas de la animación.
Fuente: Elaboración propia.



Capítulo 7

Comparación de resultados

7.1. Resumen cuantitativo de los tres métodos

Se pudo observar las características físicas del movimiento del fluido que atraviesa el sifón por medio del método numérico. Sin embargo, otro de los objetivos de esta tesis es la validación del diseño hidráulico a través de los datos obtenidos de la modelación numérica, para ello tenemos también los datos de un modelo físico existente obtenido de los aforos en campo y se podrán comparar con los resultados obtenidos de las fórmulas matemáticas; comprobando si realmente la simulación en ANSYS CFX es eficiente y confiable. Así determinaremos que los modelos numéricos serán una herramienta viable para diseños hidráulicos. En las siguientes tablas se muestra un resumen de las variables calculadas por cada método empleado: analítico, experimental y numérico.

Tabla 37. Resumen de los resultados de presión calculados por método analítico y el método numérico.

	Parámetro	Presión total (PA) Q= 31.807 m ³ /s	Presión total (PA) Q= 44.097 m ³ /s
Método Analítico	Punto en el canal y Quiebre 2-3	44611	60777
	Punto en el canal y Quiebre 19-20	95623	111789
	Punto en el canal y Quiebre 27-28	50497	66663
Método numérico	Malla 0.4 tetraédrica (2-3)	46325	62781
	Malla 0.4 tetraédrica (19-20)	88381	104547
	Malla 0.4 tetraédrica (27-28)	43926	59492
Variación (%)	Sifón - Quiebre 2-3	3.70%	3.19%
	Sifón- Quiebre 19-20	7.57%	6.48%
	Sifón - Quiebre 27-28	13.01%	10.76%

Fuente: Elaboración propia.

- Se hizo una comparación de los valores de las presiones obtenidos por el método analítico, por medio de la Ecuación de Bernoulli. Las variaciones de resultados son aceptables en los primeros tramos del sifón, presentando una variación menor o igual al 5%. Sin embargo, el porcentaje de variación aumenta casi al 10% en el tramo final del sifón. En esta zona de la estructura se debió tener mayor cuidado al momento de discretizar la malla computacional en ANSYS CFX para obtener resultados más precisos. Se eligió trabajar con una malla computacional 0.4 tetraédrica ya que presenta menor porcentaje de variación si se compara con mallas de diferente dimensión. La Tabla 37 de presiones muestra la variación de resultados.

Tabla 38. Resumen de los resultados calculados por método analítico y el método numérico para un $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$

		Método analítico		Método numérico		Variación (%)	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Características del canal	Caudal (m ³ /s)	31.807		31.7910	31.8184	0.050%	0.036%
	Cota nivel de agua (m)	26.120	23.253	26.282	23.240	-	
	Cota de fondo (m)	23.700	22.000	23.700	22.000		
	Tirante (m)	2.420	1.253	2.582	1.240	5.258%	1.022%
	Área Canal (m ²)	20.885	8.618	21.802	8.506	4.210%	1.298%
	Veloc. Canal (m/s)	1.523	3.691	1.458	3.752	4.258%	1.642%
Características del sifón (2 tuberías)	Área tubería sifón (m ²)	6.875				-	
	Veloc. Tubería (m/s)	2.313		2.356			
	Díámetro tubería (m)	2.959				-	
	Longitud por sección (m)	9.250					
Pérdidas	Pérdidas por entrada(m)	0.015		0.017		-	
	Pérdidas por salida(m)	0.084		0.011			
	Pérdidas por codos(m)	0.058		0.058			
	Pérdidas por fricción(m)	0.475		0.493			
	Pérdidas por conducto(m)	0.063		0.065			
	Pérdidas totales(m)	0.527		0.623		15.409%	
	Factor seguridad (10%)	0.580		0.6853		15.366%	
Carga hidráulica admisible	E1 (m)	26.098		26.250		0.578%	
	E2 (m)	23.948		23.541		1.696%	
	E1-E2 (m)	2.151		2.709			

Fuente: Elaboración propia.

- En Tabla 38 se observan los valores de los caudales, el caudal de referencia es el caudal obtenido en el aforo de campo $31.807 \text{ m}^3/\text{s}$. Siendo así, es de mayor interés en esta investigación comprobar que los caudales de los 3 métodos tengan menos de 1% de error de variación. Se logra con éxito un 0.050% y 0.036% para el método analítico y numérico respectivamente, comprobando que el caudal de entrada debe tener un valor aproximadamente similar al caudal de salida, por el principio de continuidad.
- En la Tabla 38 se observa que la variación de velocidades para un caudal de $31.807 \text{ m}^3/\text{s}$ en las tuberías, para ambos métodos, cumple con los criterios de diseño de sifones, el cual define que el agua que transporta arenas u otros materiales abrasivos se limita la velocidad a un máximo de 3 m/s, y con el objetivo de no tener obstrucciones y dificultades durante la operación, la velocidad mínima del agua debe ser de 1.5 m/s; los valores encontrados son de 1.523 y 1,458 a la entrada y 3.691 y 3.752 a la salida del sifón; indicando así que se ha logrado buenos resultados.

Tabla 39. Resumen de los resultados calculados por método experimental para un $Q = 44.097 \text{ m}^3/\text{s}$.

		Método analítico		Método numérico		Variación (%)	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Características del canal	Caudal (m ³ /s)	44.097		43.774		0.732%	
	Cota nivel de agua (m)	27.210		27.038		-	
	Cota de fondo (m)	23.7		23.7			
	Tirante (m)	3.51		3.338		4.900%	
	Área Canal (m ²)	29.87		27.832		6.822%	
	Veloc. Canal (m/s)	1.476		1.573		6.153%	
Características del sifón (2 tuberías)	Área tubería sifón (m ²)	6.875				0.935%	
	Veloc. Tubería (m/s)	3.210		3.180			
	Diámetro tubería (m)	2.959				-	
	Longitud por sección (m)	9.250					
Pérdidas	Pérdidas por entrada(m)	0.041		0.039		-	
	Pérdidas por salida(m)	0.073		0.071			
	Pérdidas por codos(m)	0.112		0.110			
	Pérdidas por fricción(m)	0.9118		0.899			
	Pérdidas por conducto(m)	0.1206		0.119			
	Pérdidas totales(m)	1.259		1.237		1.710%	
	Factor seguridad (10%)	1.3849		1.361		1.710%	
Carga hidráulica admisible	E1 (m)	27.1812		27.024		0.578%	
	E2 (m)	25.2573		25.213		0.175%	
	E1-E2 (m)	1.924		1.811		-	

Fuente: Elaboración propia.

- El sifón funcionará de manera correcta, ya que no existe problema hidráulico por pérdida de energía, debido a que, en los 3 métodos analizados, la carga hidráulica admisible es mayor a las pérdidas totales de energía que ocurren en la estructura. Así tendremos cargas hidráulicas de 2.151 m, 2.709 m cuando $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$ y 1.924 m y 1.811 m. cuando $Q = 44.097 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Los resultados de variación en la salida del canal no fueron tomados en cuenta usando $Q = 44.097 \text{ m}^3/\text{s}$ como muestra la Tabla 39, debido a que este valor de caudal obtenido por el correntómetro, no se pudo obtener en el canal a la salida del sifón.

Tabla 40. Resumen de los resultados calculados por método experimental y el método numérico con $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q = 44.097 \text{ m}^3/\text{s}$.

Parámetros	Método Experimental			Método numérico			Error de variación (%)		
	Corrento.	Flotador (Entrada)	Flotador (Salida)	Corrento.	Flotador (Entrada)	Flotador (Salida)	Corrento.	Flotador (Entrada)	Flotador (Salida)
Caudal (m^3/s)	44.097	31.807	30.099	43.774	31.791	31.863	0.732%	0.048%	5.536%
Velocidad (m/s)	1.224	1.692	1.601	1.310	1.487	3.752	6.574%	12.122%	-
Tirante(m)	3.510	2.420	2.420	3.338	2.584	1.240	4.915%	6.336%	-

Fuente: Elaboración propia.

- Para diseñar un modelo numérico es necesario contar los parámetros presentes en el modelo físico de la estructura hidráulica o contar con valores reales de la estructura a fin de obtener resultados que puedan discutirse con la realidad.
- Es esencial realizar ensayos con instrumentos que se encuentren en óptimas condiciones. Por ello, antes de realizar los aforos de campo que se mencionan en esta tesis, fue necesario evaluar las condiciones en las que se encontraba el correntómetro. La variación de los resultados pudo deberse a la falta de calibración del instrumento, nuestras pruebas disponían de un error de $\pm 1.100 \text{ lts/s}$ (dato obtenido de la comparación del equipo de aforo del Proyecto Especial Chira-Piura con el equipo de medición de la Universidad de Piura). De igual forma el método del flotador, el cual no es la primera opción para un ensayo de campo por arrojar valores estimados a comparación de los valores reales; sin embargo, facilita el avance de los ensayos ya que se puede realizar sin poner en peligro al observador.

Tabla 41. Resumen de los resultados en la variación de la energía.

Método	VARIACION DE LA ENERGIA			
	Caudal (m ³ /s)	Ei (m)	Ef (m)	Variación (%)
Numérico	31.791	26.250	23.541	10.318
Analítico	31.807	26.098	23.947	8.240
Experimental	44.097	27.1812	25.257	7.077

Fuente: Elaboración propia.

- La disipación de energía en los 3 métodos utilizados, corresponde a los valores esperados debido a que disminuye al incrementarse el caudal. Además, cabe mencionar que la rugosidad de las paredes del sifón tiene una gran influencia en la variación de la disipación de la energía, tal como se explica en la tesis de (Monge, 2017), haciendo un estudio de una estructura de contorno liso y rugoso; y concluyendo que la rugosidad es directamente proporcional a la disipación de energía, mientras que el caudal es inversamente proporcional a la misma. Dicha información sirve de apoyo a nuestros resultados obtenidos en la Tabla 41. El fluido perderá o aumentará resistencia cuando se use una rugosidad distinta de 0.36 mm (concreto simple).

Tabla 42. Comparación de principio de continuidad.

Parámetros	Método numérico		Método experimental		Error de variación %	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
Caudal 1	31.742	31.863	31.806	30.099	0.380%	5.368%
Caudal 2	43.774	44.157	44.097	-	0.867%	-

Fuente: Elaboración propia.

- Se apreciará mejores resultados si los caudales de entrada varían de los caudales de salida, con porcentajes menores a 5%. Esta variación se presenta por la naturaleza de las ecuaciones que rigen el movimiento de los fluidos dentro de ANSYS, arrojando residuales numéricos en cada iteración, por lo que se estima pequeños cambios en los resultados.
- La Tabla 42 evalúa los valores de los caudales obtenidos por ANSYS CFX, mostrando que los resultados varían en 0.380 % para un caudal de $Q = 31.742$ m³/s y 0.867 % para $Q = 43.774$ m³/s, siendo incluso menores al 1%.
- Por otro lado, la Tabla 42, nos muestra también una variación mayor a 5% para el método experimental usando flotadores, con un $Q = 31.742$ m³/s en la entrada del sifón. Esto explicado por el propio método, indicando que los flotadores nos pueden dar resultados

inexactos, con mayor probabilidad de error por la presencia de factores externos como turbulencias u obstrucciones, que harán variar los resultados.

- El método del correntómetro con $Q = 43.774 \text{ m}^3/\text{s}$ en la entrada del sifón, nos entrega caudales más reales y aceptables, sin embargo, no pudo hacerse una medición a la salida del sifón por motivos de no encontrar un punto seguro o de protección para utilizar el correntómetro.



Conclusiones

- Se observa que tanto el método experimental como el método numérico demostraron que cumple con el principio de continuidad del flujo del fluido en un sistema de tubería cerrado como es el sifón; con porcentajes de variación del valor de masa menores al 5%. La cantidad de flujo de agua que presenta el sifón a lo largo de su sección es constante, de flujo estable.
- A través del método numérico se logró obtener los vectores de velocidad, los cuales muestran la dirección y magnitud de la velocidad en cada punto del sifón y detectar las líneas de flujo, remolinos o arrastre de sedimentos. Es por eso, que podemos observar que presenta una mayor velocidad de aproximadamente 6.2 m/s y una velocidad promedio de 4 m/s en la tubería; esto luego de que la tubería del sifón se encuentre totalmente llena y con un flujo constante trabajando a presión.
- Se visualizó las características físicas del movimiento del fluido que atraviesa el sifón por medio de los gráficos y perfiles de velocidad, presiones, líneas de corriente y fracciones de volumen agua – aire, y así tener un mayor entendimiento sobre el comportamiento de esta estructura hidráulica.
- Se obtuvieron resultados numéricos acordes con los resultados de los métodos experimental y analítico. Los resultados variaron en un 10% por parámetro evaluado, permitiendo discutir los resultados debido a que la información entregada en las mediciones no es realmente representativa ya que hubo dificultad en la toma de datos, estado del equipo de medición, puntos de ubicación y posible arrastre de sedimentos en el canal.
- En el apartado 6.4.3.6 se explicó el uso del modelo de turbulencia SST aplicado sobre nuestro modelo numérico del sifón. Al tener los valores de las variables como velocidad y presión y al ser comparados con el método experimental empleado en el modelo físico, se mostró resultados que se asemejan, variando en menos de un 10%. Así demostramos que nuestro modelo representa con bastante fiabilidad el comportamiento de la estructura, pudiendo ser un complemento de los modelos físicos.

- Además, ante futuras deficiencias se podría efectuar correcciones sobre la geometría del sifón para lograr un mejor funcionamiento. La discretización de la malla sobre los volúmenes finitos que forman los dominios del sifón, satisface las ecuaciones de conservación, y obtiene buenos resultados siempre comparados con los valores permisibles de calidad.
- El análisis de las líneas de corriente en los diferentes dominios del sifón, localiza las zonas en donde se produce recirculaciones de flujo.
- La validación del diseño hidráulico se logró a través de los resultados obtenidos por los 3 métodos y la variación del porcentaje de error hallado al comparar sus variables, encontrando además una herramienta confiable y complementaria para el diseño y optimización hidráulica del sifón, demostrando que es posible hacer una representación de la realidad por medio de un modelo físico. Por otro lado, favorece los estudios de prevención y mantenimiento que se realizan en la región de Piura sobre las estructuras hidráulicas.
- En la configuración de nuestro modelo numérico, se escogió el tipo de análisis estacionario o permanente para el desarrollo de la simulación, este análisis permite que todas las magnitudes hidráulicas en estudio sean constantes en el tiempo, describiendo el fenómeno natural mediante iteraciones. La finalización exigió revisar el criterio de convergencia, el cual evalúa 3 parámetros fundamentales: los residuales, los imbalances y puntos de monitoreo. Todos estos parámetros fueron evaluados y aceptados en nuestra tesis, cumpliendo con la teoría de convergencia.
- Con el fin de conocer el desarrolló del modelo numérico con un tipo de análisis transitorio bajo configuraciones similares al análisis estacionario, se obtuvo un tiempo de duración de 5 días aproximadamente para finalizar, tiempo mayor al empleado para la simulación estacionaria, la cual solo demoró 2 días aproximadamente.
- Es necesario contar con un medio adecuado para calcular el tipo de flujo y observar su comportamiento, sabiendo que resulta imposible una observación directa en fluidos que fluyen por tuberías cerradas. Es posible hacer una verificación de manera analítica gracias al número de Reynolds (Nr) en secciones circulares, cuyas aplicaciones prácticas en laminar si es menor a 2000 y turbulento si es mayor a 4000. Al trabajar con un $Q = 31.807 \text{ m}^3/\text{s}$, obtuvimos un $Nr = 6844014$; mientras que para un $Q = 43.774 \text{ m}^3/\text{s}$, obtuvimos un $Nr = 9418992$. comprobando que existe un flujo turbulento en el interior del sifón.
- Mostrados los porcentajes de variación entre las variables como velocidad, caudal, tirante, presión, etc. de los 3 métodos analizados, se concluye diciendo que los valores obtenidos

con la ayuda del correntómetro, son más confiable de utilizar, debido a que muestran porcentajes de variación menor a los obtenidos por el flotador.

- En el diseño de muchas estructuras hidráulicas como: bocatomas, desarenadores, rápidas, alcantarillas, sifones invertidos; la mayoría de fórmulas empleadas, son el resultado de ensayos experimentales. Las fórmulas que se utilizan en el cálculo de la verificación del sifón Piura y que son parte del método analítico en esta tesis, nos entrega confiabilidad al momento de aplicarlas, permitiendo así, en el capítulo 7 hacer una comparación con los valores calculados por ANSYS CFX.





Recomendaciones

Se considera que la investigación se puede ampliar tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Realizar el estudio del diseño del sifón a través del análisis transitorio y así evaluar los cambios que atraviesan una variable específica en cada paso de tiempo. Al mismo tiempo se podría analizar los posibles daños sobre la estructura, esto por medio de los esfuerzos de corte.
- Hacer un estudio comparativo del comportamiento del sifón, cuando ésta opera con una sola tubería y cuando opera con ambas tuberías; y determinar si el caudal de agua que recorre la estructura hidráulica no produce daños.
- Capacidad erosiva y arrastre de sedimentos sobre la estructura del sifón Piura. Un análisis que permita determinar las zonas más afectadas por el arrastre de sedimentos y cómo afecta la erosión de la roca y el suelo al sifón.
- Capacidad de captación cuando el sifón opere con una sola tubería.
- Comparación con un modelo físico del proyecto a simular. Será posible si se construye un modelo físico con las características del sifón.
- Efectos de la rugosidad sobre las paredes del sifón, con fines de mejorar el diseño. Desarrollar un modelo del sifón con rugosidad variable, que permita comparar los resultados obtenidos.
- Alta capacidad computacional del equipo, es decir para realizar una modelación óptima en el menor tiempo posible y sin limitaciones, será necesario contar con un modelo de computadora que sea eficaz en los cálculos computacionales que el modelo numérico necesite.



Referencias bibliográficas

Ansys 16.1. (2012). *Meshing Help*.

ANSYS Inc. (2013). *Theory Guide*.

Ansys Inc. (2015). *ANSYS CFX Introduction*. Release 16.0.

Ansys Inc. (2017). *ANSYS Meshing Advanced Techniques*. 17.0 Release.

Arteaga Acuña, F. (2017). *Análisis hidráulico de la bocatoma María Auxiliadora del río Quiroz con modelo numérico tridimensional*. (Tesis de Pregrado), Universidad de Piura, Piura, Perú.

Atoche, J., & Vásquez, J. (2001). *Experiencias en la modelación numérica hidráulica de agua superficial*. XIII CONIC, Puno. Obtenido de <http://dev2.construccion.org/biblioteca/articulo/experiencias-modelacion-numerica-hidraulica-agua-superficial-465>

Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Manual de Criterios de Diseños de Obras Hidráulicas para la formulación de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales de Afianzamiento Hídrico*. Lima, Perú.

Bayona, C., Londoño, L., & Nieto, E. (2015). *Identificación del modelo de turbulencia más adecuado, utilizando software de dinámica de fluidos computacional, para el diseño de vehículo urbano de la competencia Shell Eco Marathon*. (Tesis de Pregrado), Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia.

Bustamante Campoverde, J. (2018). *Simulación y optimización del flujo de aire dentro de una incubadora neonatal utilizando el método de los elementos finitos*. (Tesis de posgrado), Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Carrera, J. (2019). *Modelación numérica de la unión de dos conducciones a presión de diferente geometría aplicando el programa Ansys CFX*. (Tesis de Pregrado), Escuela politécnica nacional, Quito, Ecuador.

Chamorro , G. (2011). Estimación del Caudal por el Método de Flotadores. Dirección Regional de Lima, Perú. Comisión Nacional del Agua. (2009). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Coyoacán, México, D.F. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-29.pdf>

CONSORCIO IECO - SALZGITTER - LAGESA. (1981). *Informe preliminar sobre el Estudio Canal Principal de Irrigación, Bajo Piura - tramo Los Ejidos-Catacaos*. Proyecto Especial Chira - Piura , Piura.

CONSORCIO INCLAM - Ingeniería del Agua. (2012). *Diagnóstico de la Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca Chira-Piura*. Piura.

Davoudabadi, P. (2012). *The Most Accurated and Advanced Turbulent Capabilities*. Obtenido de <https://support.ansys.com/staticassets/ANSYS/Conference/Confidence/Chicago/Downloads/most-accurate-advanced-turbulence-capabilities.pdf>

Ferziger, J., & Milovan, P. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlín: Springer.

Fluent Inc. (2003). *Release 6.1 User Manual*.

Hernández Partida, J. (s.f.). Estructuras para canales, generalidades y diseño. *Capítulo 3 - Sifones*. Universidad de Sonora. Obtenido de <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=3487>

Herrera Vera, H. (2010). *Estudio del diseño hidráulico del sifón invertido Viru del proyecto Chavimochic* . Tesis de Pregrado, Trujillo, Perú.

Jaramillo, P. (2017). *Evaluación del efecto de la geometría de pilares en la socavación del cauce* . (Tesis de Pregrado), Universidad De Piura, Piura, Perú.

Kuzmin, D. (s.f.). *Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Obtenido de <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf>

Malalasekera, W., & Versteeg, H. (1995). *An Introduction to Computational Fluid, The Finite Volume Method*. Pearson Education.

Manual de diseño hidráulico de canales y obras de Artes. (1997). En Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Marbello Pérez, R. (2005). En *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica* (págs. 237-273). Medellín.

Menter, F. (2011). *Turbulence Modeling For Engineering Flows*. Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos: ANSYS, Inc.

Ministerio de Agricultura y Riego. (2014). En *Medición del agua*. Lima, Perú. Obtenido de <http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/manual-riego/manual5.pdf>

Mogollón, F. (2018). *Modelación numérica de estructuras hidráulicas 3D en Ansys – Fluent. Caso de estudio Aliviadero el Ejido*. (Tesis de Postgrado), Bogotá, Colombia.

Monge, C. (2017). *Modelo numérico de un canal de fuerte pendiente con rugosidad variable aplicando el software ANSYS CFX y comparación con los resultados obtenidos en el paquete computacional OpenFOAM*. (Tesis de Pregrado), Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Mott, R., & Untener, J. (2015). *Mecánica de fluidos* (7ma Edición ed.). México: Pearson Educación.

Noblecilla Palomino, L. (2019). *Modelación numérica para determinar la orientación de una bifurcación en el Tramo B del Río Piura*. (Tesis de Pregrado), Universidad de Piura, Piura, Perú.

Palomino Ramírez, M. (2017). *Análisis y diseño de sifón*. (Trabajo de suficiencia profesional), Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua, Perú.

Proyecto Subsectorial de irrigación. (2005). *Manual de hidrometría*. Convenio marco de cooperación interinstitucional inrena - UCPSI.

Ruiz Venegas, C. (2017). *Calibración Hidráulica del Desarenador San Gabán II Analizando los modelos de turbulencia con Telemac - 3D*. Tesis de Pregrado, Universidad de Piura, Piura.

Sánchez Folch, N. (2016). *La aerodinámica del fórmula World Series y mejora de la eficiencia del ala delantera*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, España.

Torres, P. (2018). *Caudales, aforo y cálculos de las persistencias*. Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua, Perú.

Vásquez Ojeda, J. (2003). En *Modelación numérica en hidráulica*. Obtenido de <http://www.oocities.org/hidropiura/ModelNum.pdf>

Ven Te Chow. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá, Colombia.

Villarroel Quinde, L. F. (2015). *Simulación numérica de un flujo de agua a través de una válvula tipo mariposa de doble excentricidad*. Tesis de posgrado, Pontificia Universidad Católica Del Perú, Lima, Perú.

Villón Béjar, M. (2005). *Diseño de estructuras hidráulicas*. Lima, Perú.

White , F. (2004). *Mecánica de fluidos*. Madrid, España : McGraw Hill .

Wilcox , D. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc. California, Estados Unidos.

Wilcox, D. (1993). *Turbulence Modeling for CFD*. California, Estados Unidos: DCW Industries Inc.



Apéndices





Apéndice A - Planos del sifón

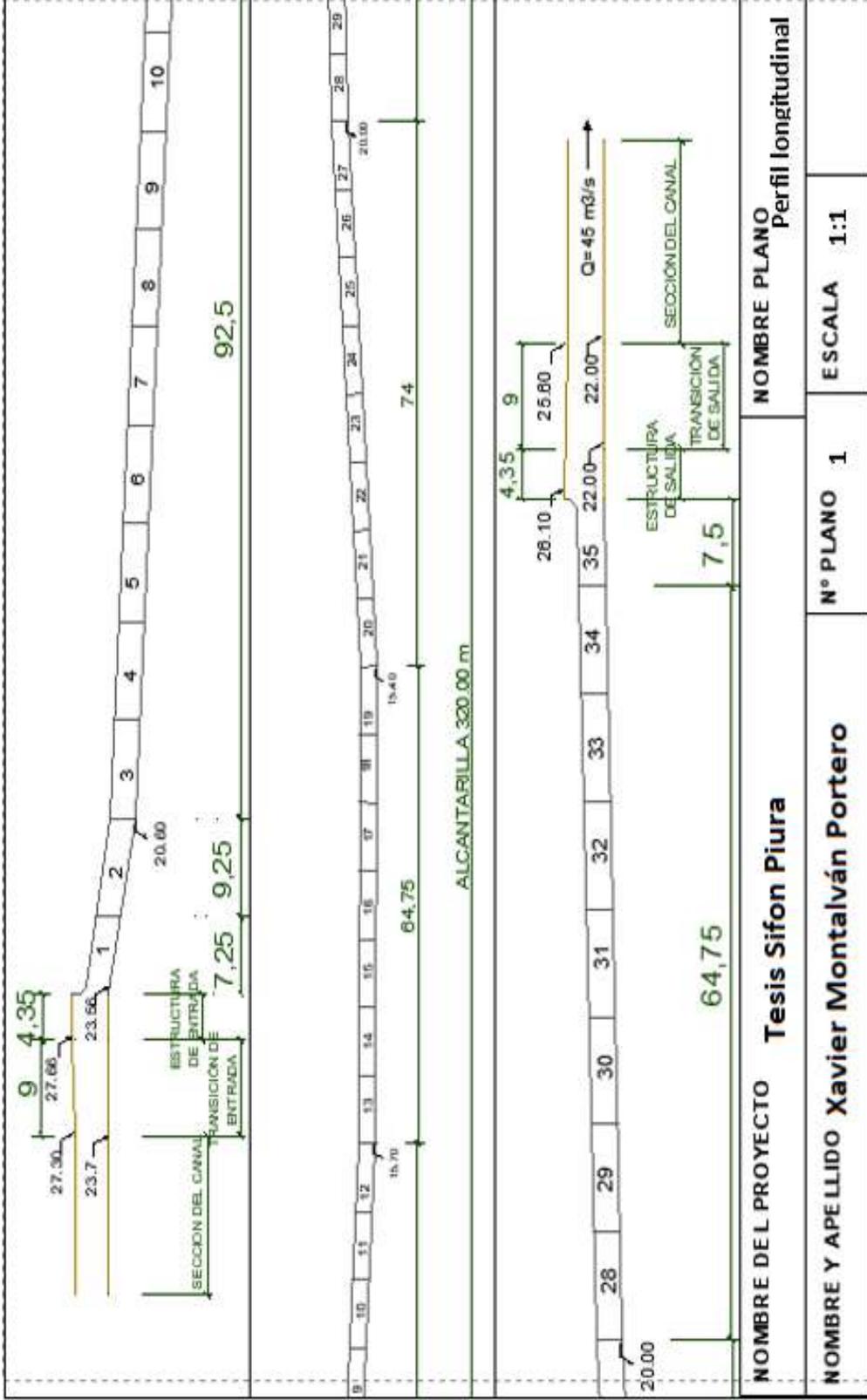


Figura 1. Perfil longitudinal del sifón en AUTOCAD.
Fuente: Elaboración propia.

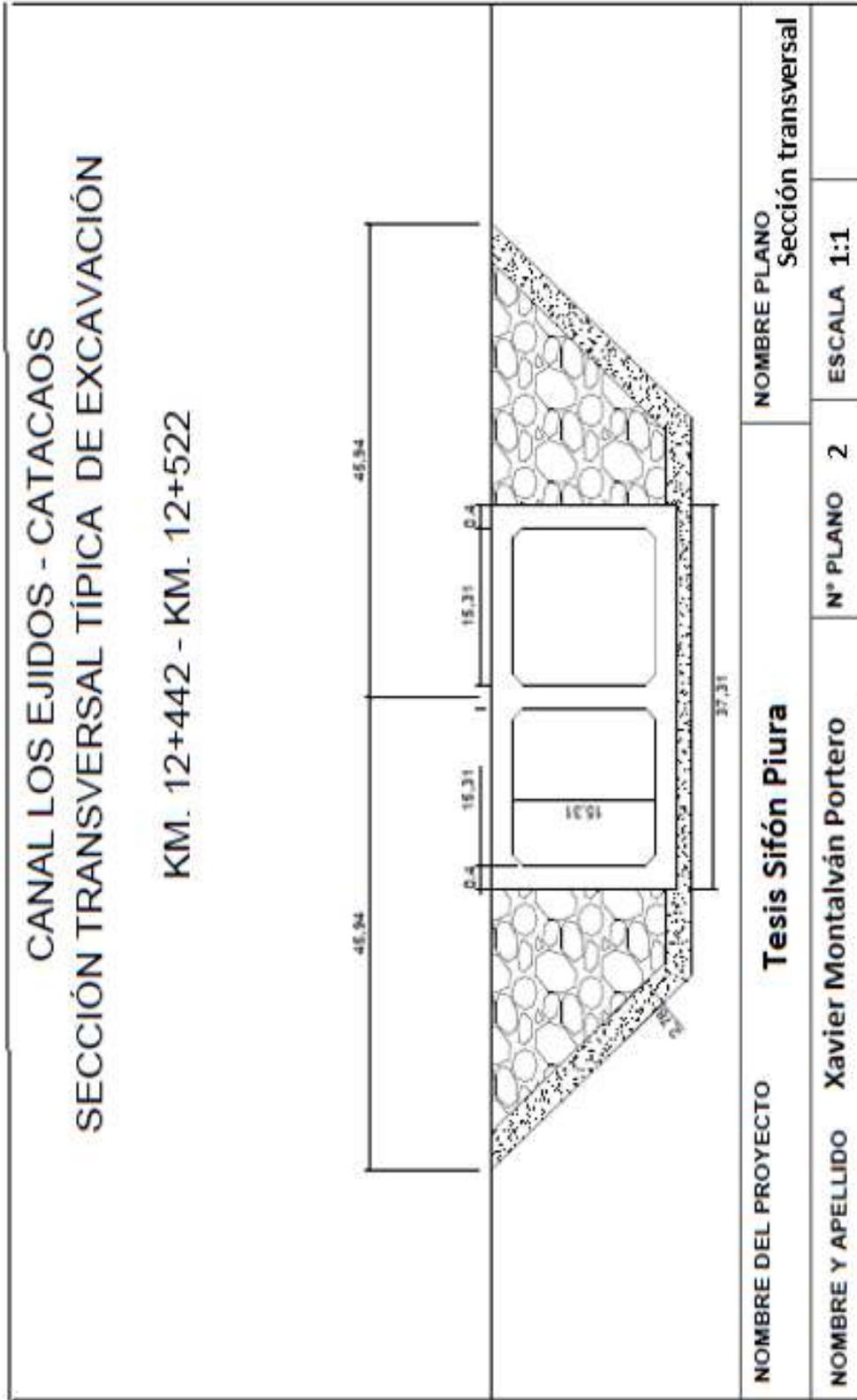
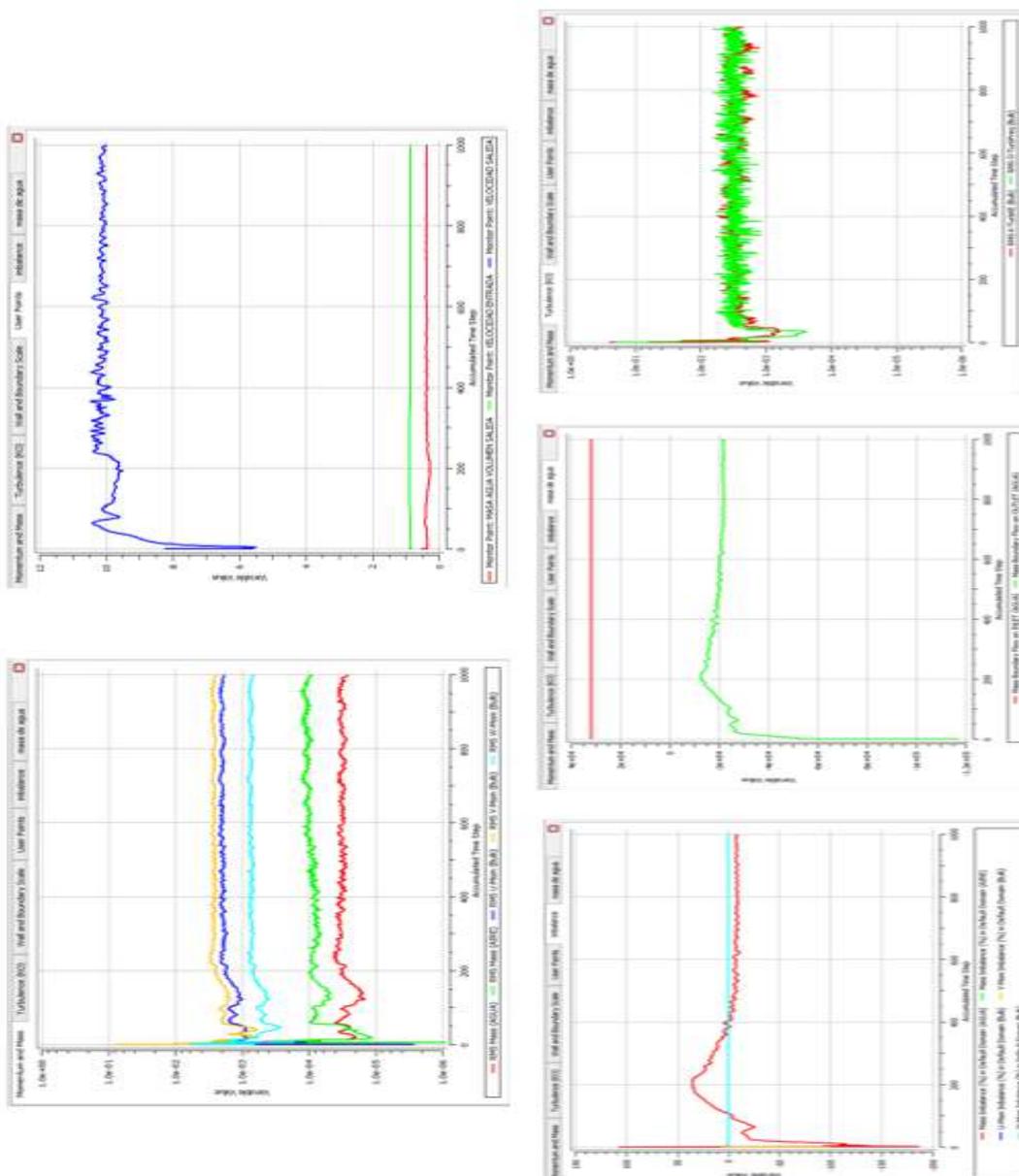


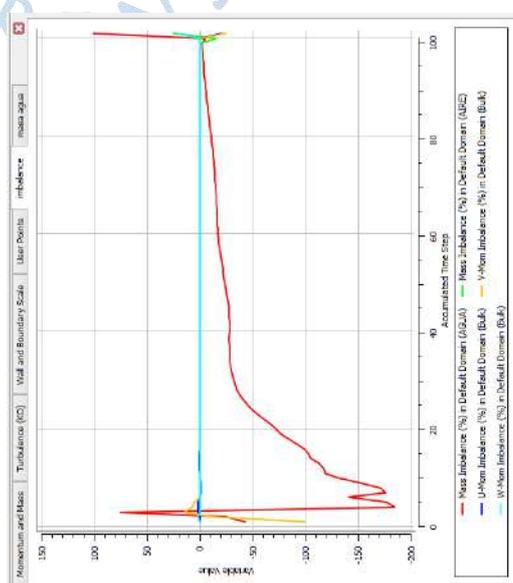
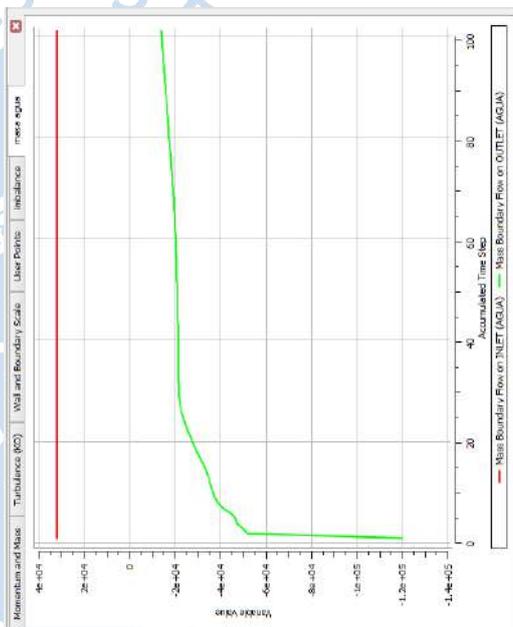
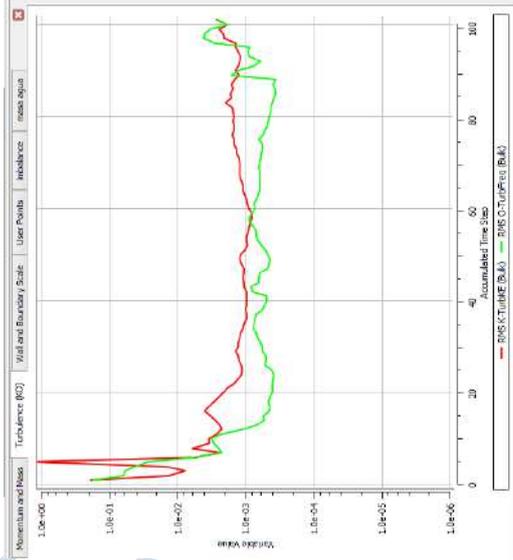
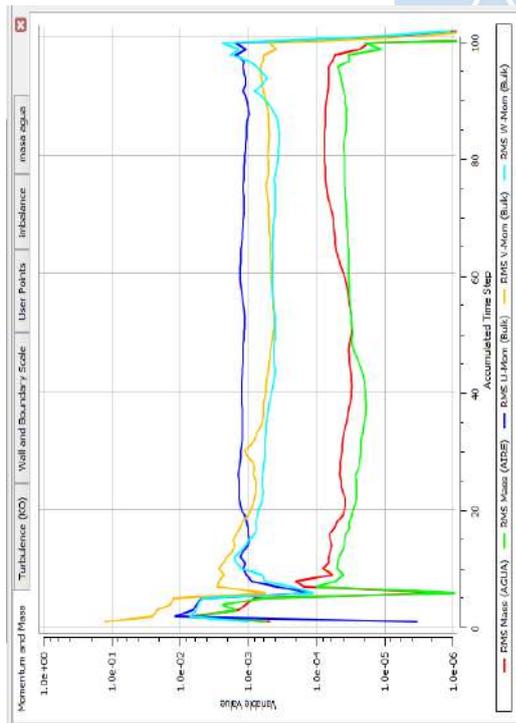
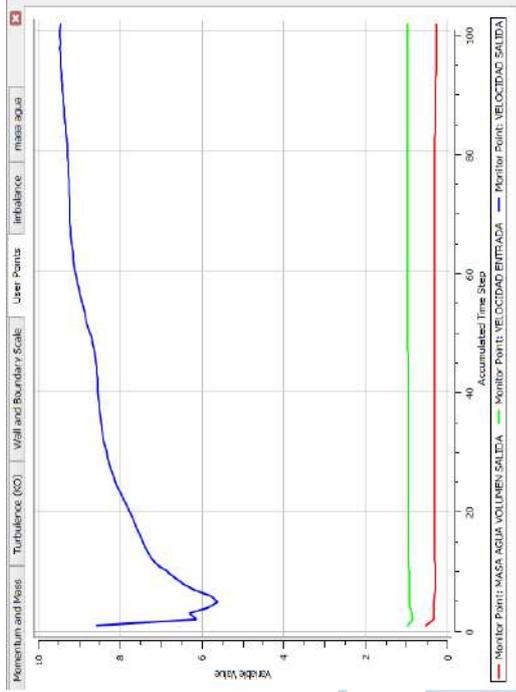
Figura 2. Sección transversal del sifón en AUTOCAD.
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice B - Dimensionamiento del malla

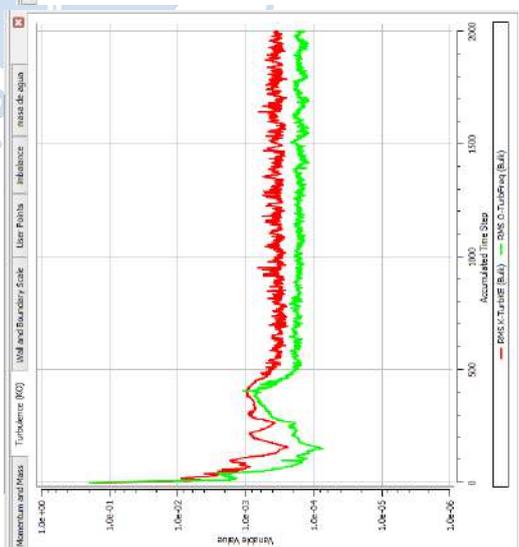
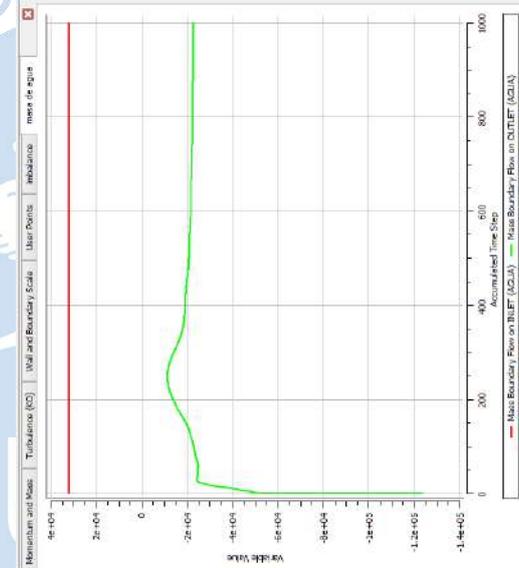
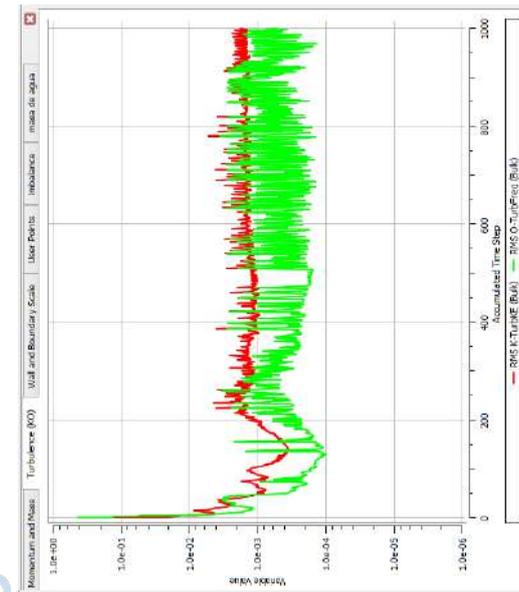
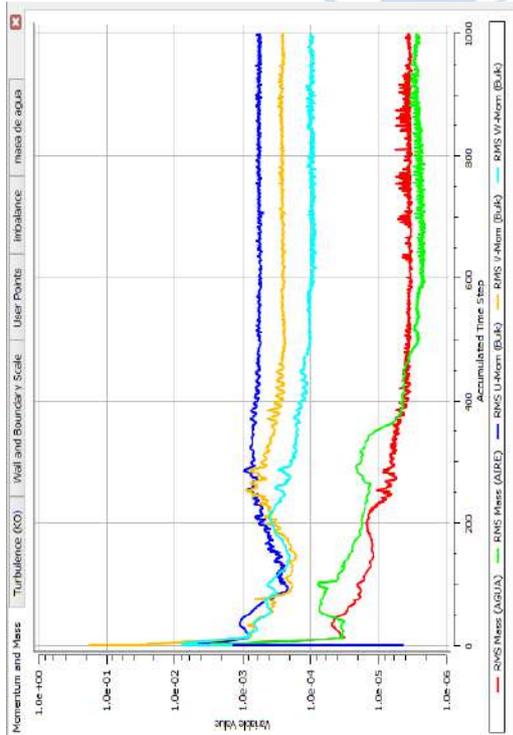
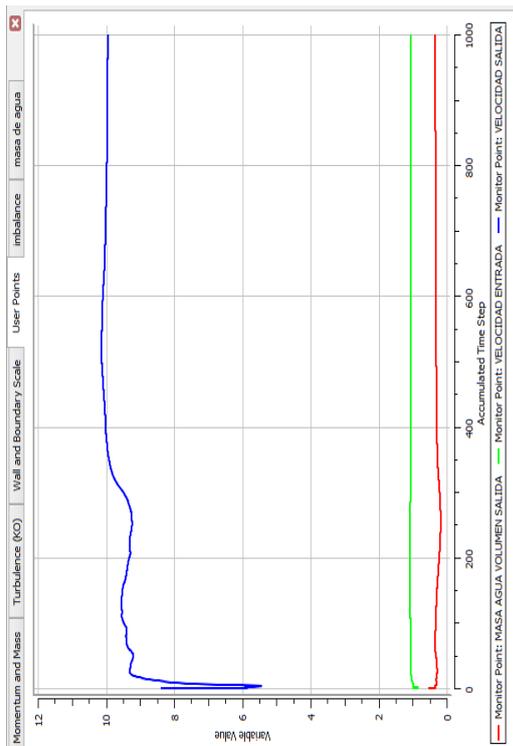
Apéndice B-1. Resultados de la malla del tipo estructurada. Se visualizan los gráficos de: Gráfico de los residuos promedios de los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de conservación de momentum y masa. Gráfico de los residuos promedios de los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de turbulencia. Gráfico de las variables que han sido seleccionadas para su estudio. Gráfico de imbalances de las ecuaciones que rigen el comportamiento del fluido. Gráfico que mide la cantidad de caudal que ingresa y sale de la estructura.



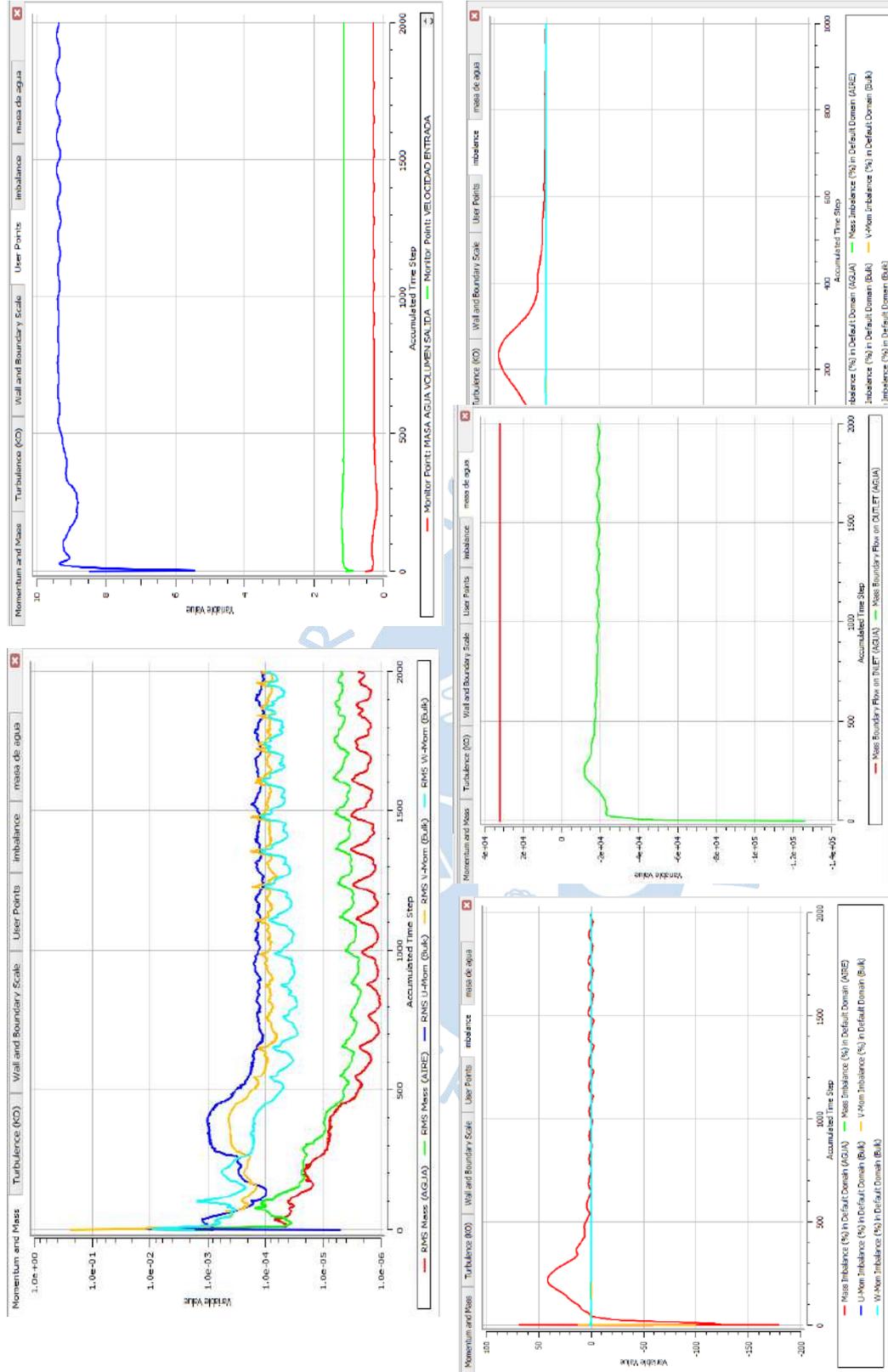
Dimensión 0.2 - Hexaédrico
Fuente: Elaboración propia.



Dimensión 0.3 - Hexaédrico
Fuente: Elaboración propia.

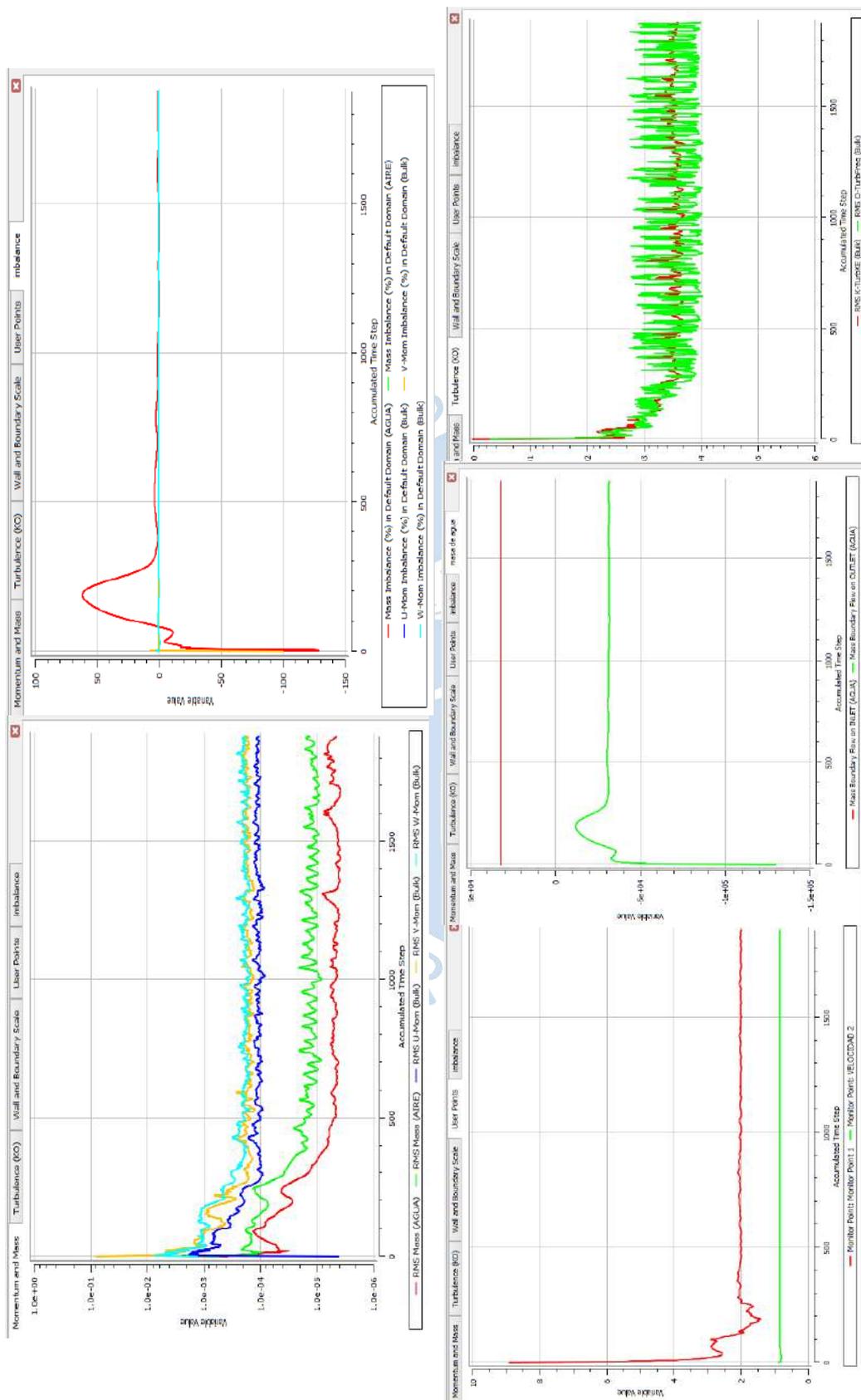


Dimensión 0,4 - Hexaédrico
Fuente: Elaboración propia.

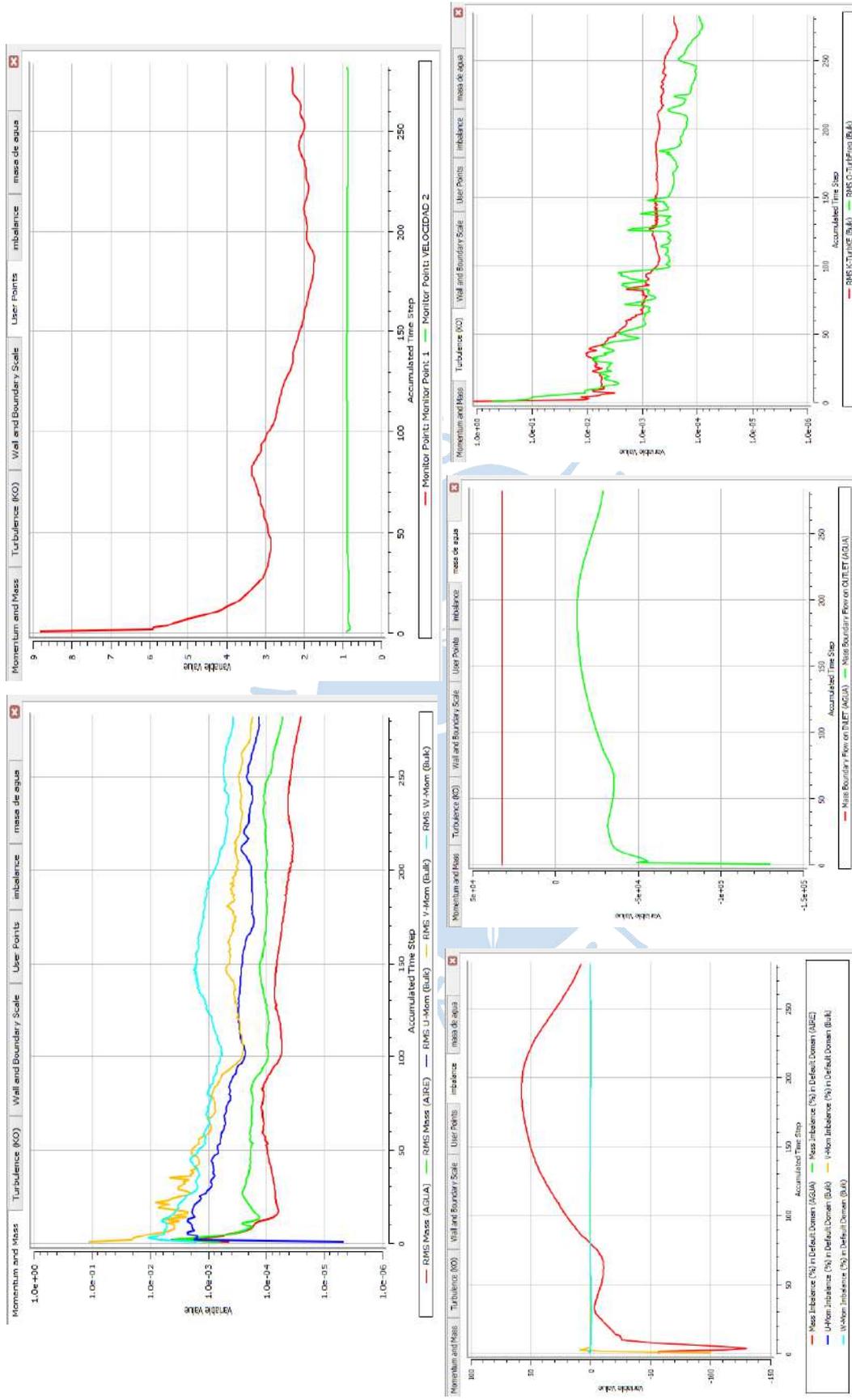


Dimensión 0.5 - Hexaédrico
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice B-2. Resultados de la malla del tipo híbrido.

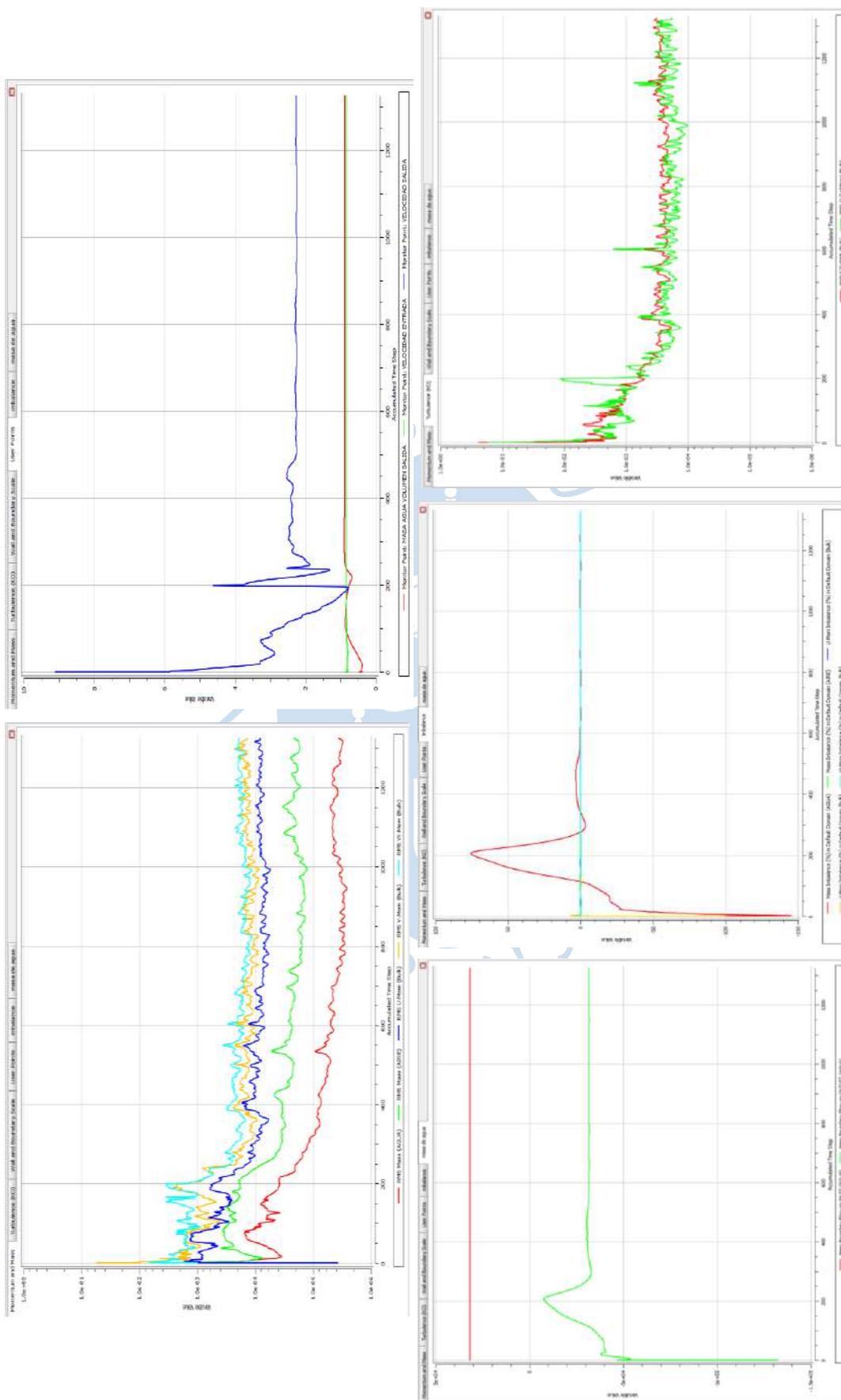


Dimensión 0.2 - Híbrido
Fuente: Elaboración propia.

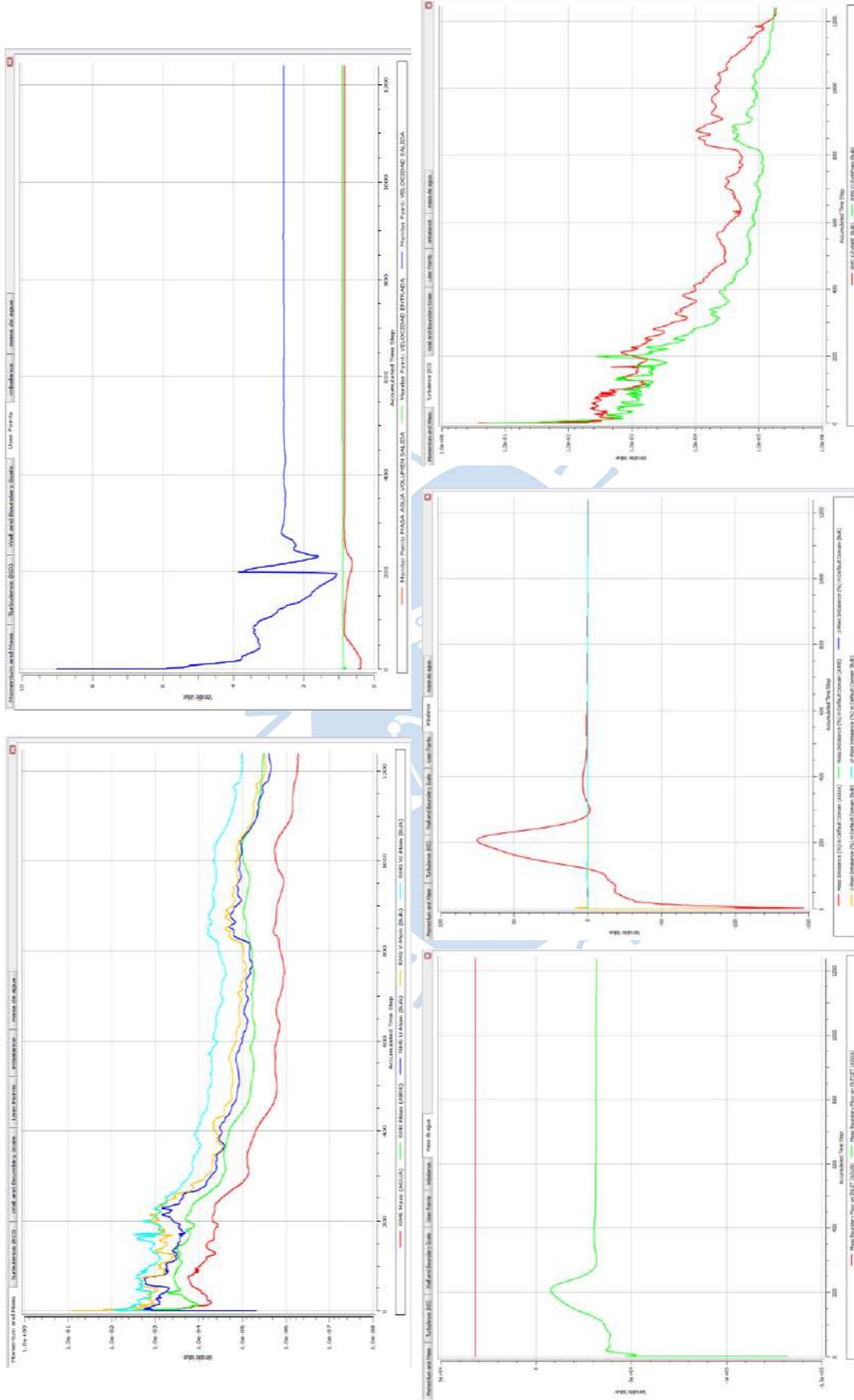


Dimensión 0.3 - Híbrido
Fuente: Elaboración propia.

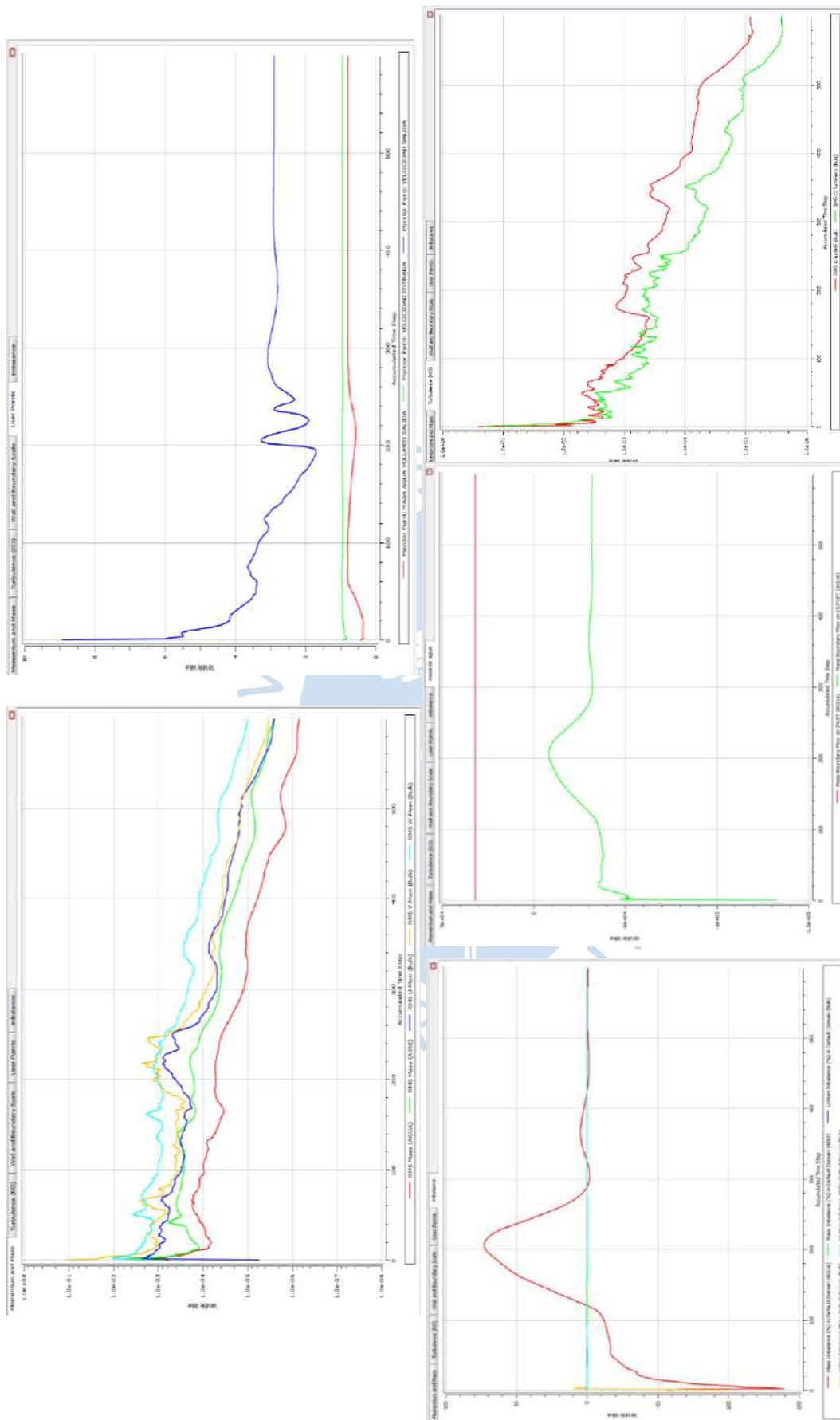
Apéndice B-3. Resultados de la malla del tipo no estructurado.



Dimensión 0.2 - Tetraédrico
Fuente: Elaboración propia.



Dimensión 0.3 - Tetraédrico
Fuente: Elaboración propia.



Dimensión 0.4 - Tetraédrico
Fuente: Elaboración propia

Apéndice B-4. Perfil de velocidades en distintas secciones del canal y el sifón.

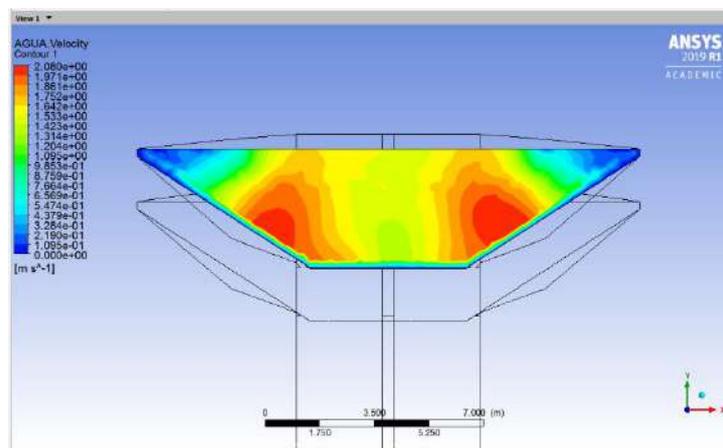


Figura 3. Vista de la sección del canal con una malla de dimensión 0.3.
Fuente: Elaboración propia.

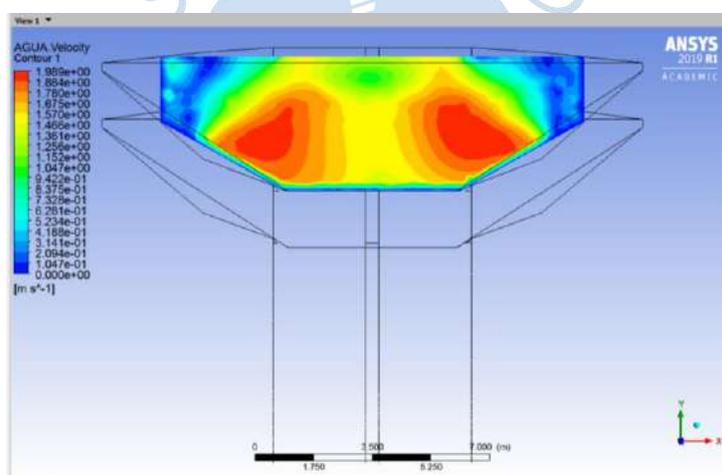


Figura 4. Vista de la sección de transición de entrada con una malla de dimensiones 0.3
Fuente: Elaboración propia.

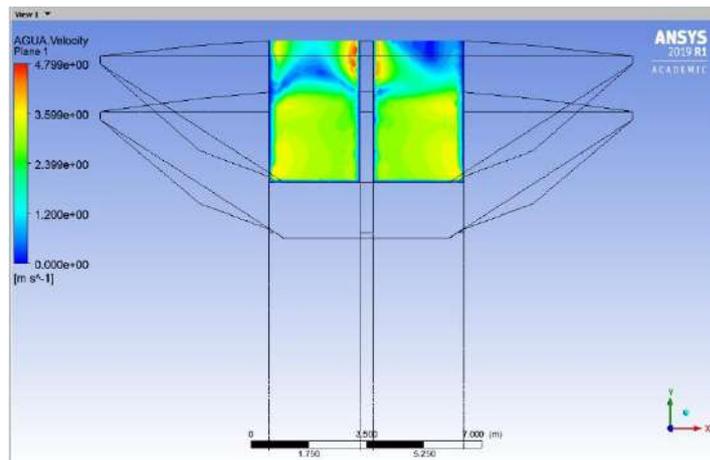


Figura 5. Vista de la entrada del sifón con una malla de dimensión 0.3.
Fuente: Elaboración propia.

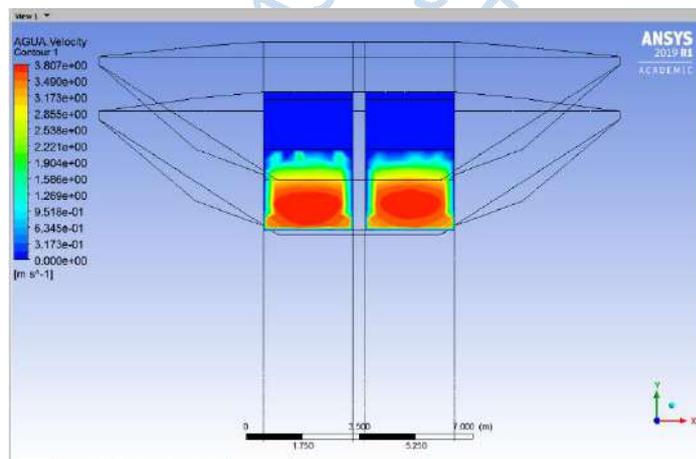


Figura 6. Vista de la salida del sifón con una malla de dimensión 0.3.
Fuente: Elaboración propia.

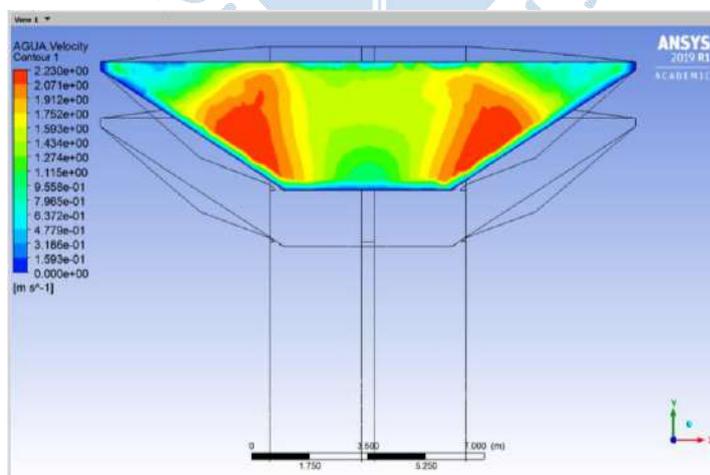


Figura 7. Vista de la sección del canal con una malla de dimensión 0.4.
Fuente: Elaboración propia.

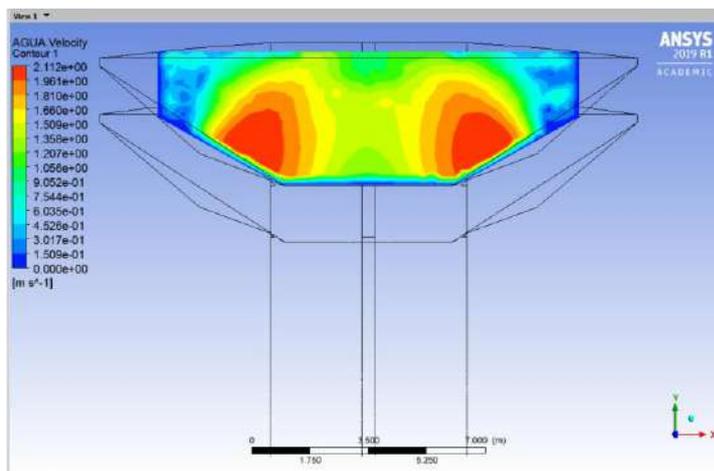


Figura 8. Vista de la sección de transición de entrada con una malla de dimensiones 0.4.

Fuente: Elaboración propia.

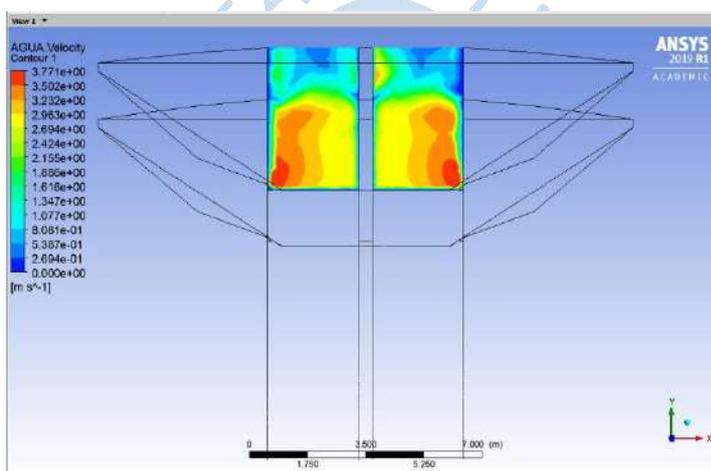


Figura 9. Vista de la entrada del sifón con una malla de dimensión 0.4.

Fuente: Elaboración propia.

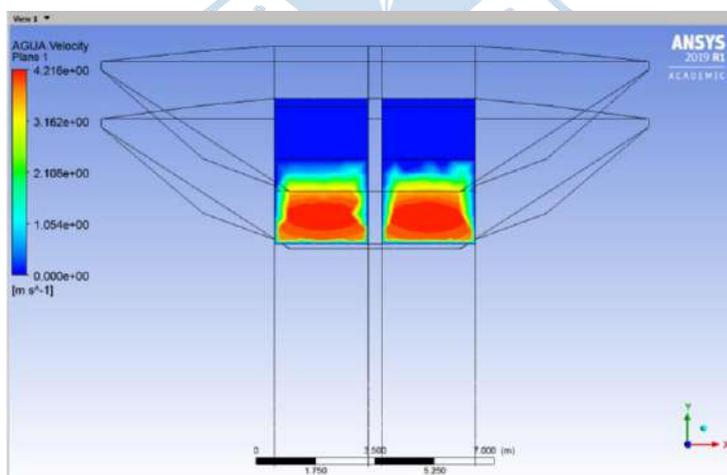


Figura 10. Vista de la salida del sifón con una malla de dimensión 0.4.

Fuente: Elaboración propia.

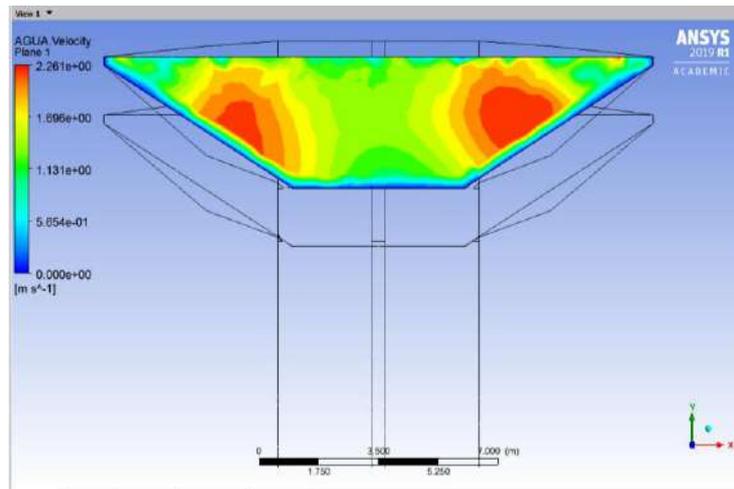


Figura 11. Vista de la sección del canal con una malla de dimensión 0.5.
Fuente: Elaboración propia.

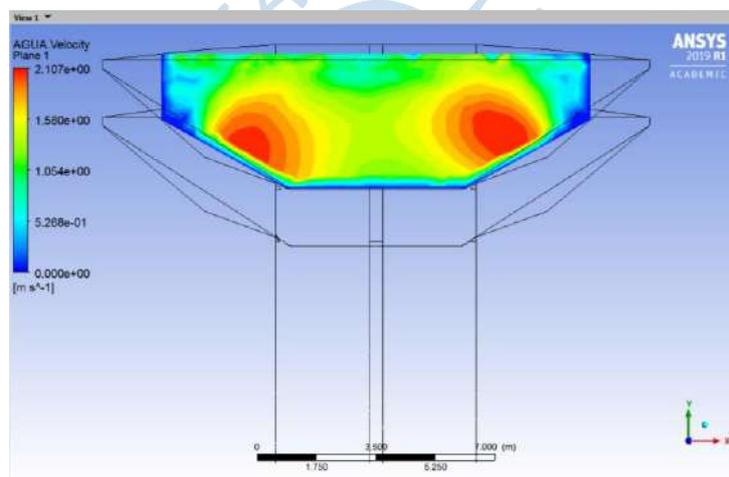


Figura 12. Vista de la sección de transición de entrada con una malla de dimensiones 0.5.
Fuente: Elaboración propia.

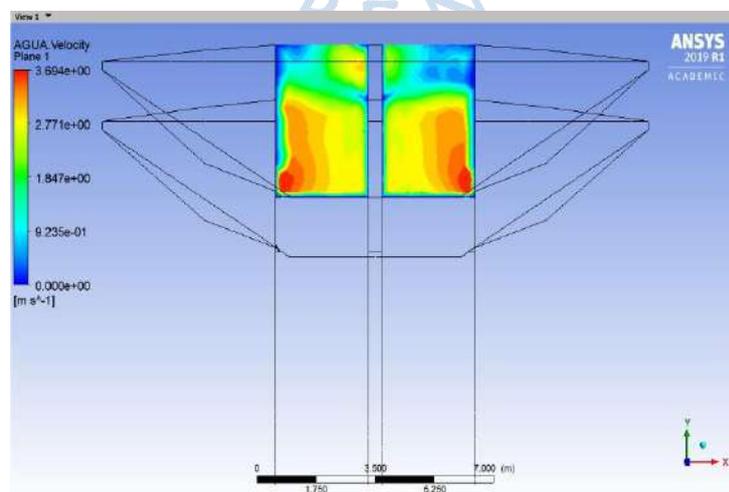


Figura 13. Vista de la entrada del sifón con una malla de dimensión 0.5.
Fuente: Elaboración propia.

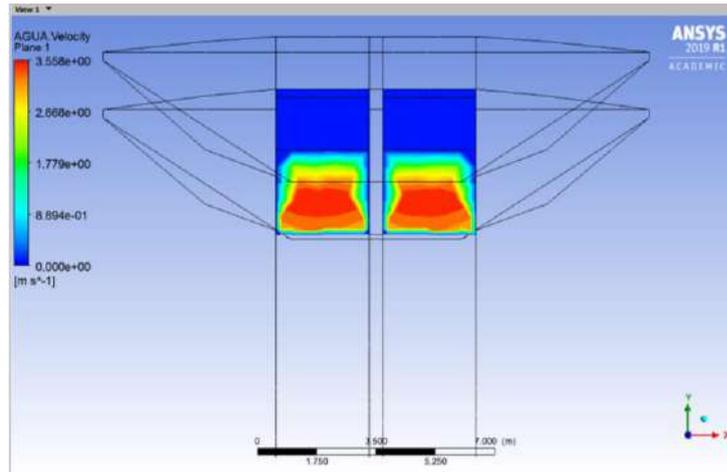


Figura 14. Vista de la salida del sifón con una malla de dimensión 0.5.
Fuente: Elaboración propia.

