



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelación numérica de la cámara de carga y rápida
hidráulica de la Central Hidroeléctrica de Curumuy**

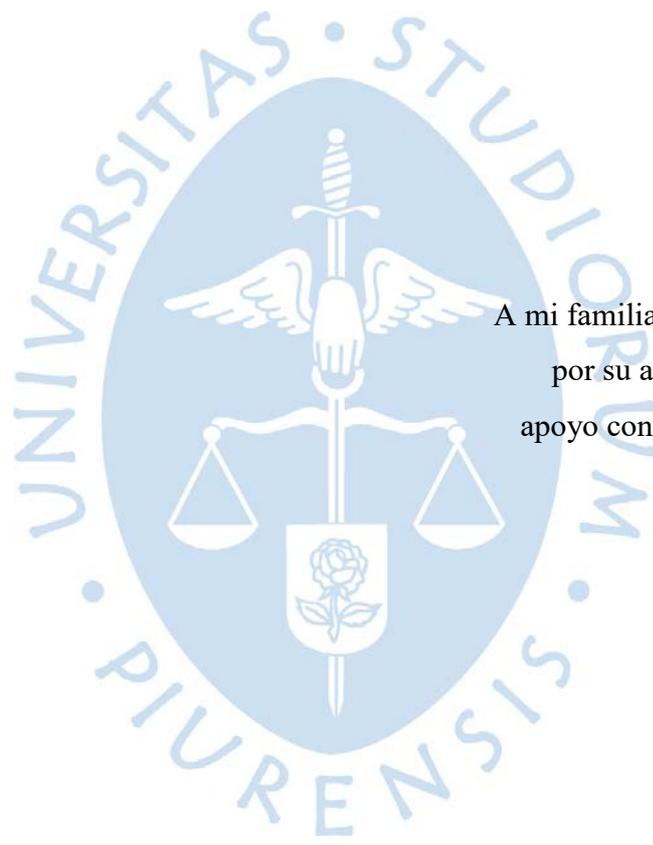
Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Carlomagno Sevilla Becerra

**Asesor(es):
Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar**

Piura, noviembre de 2020





A mi familia por forjar mi camino;
por su amor, sus consejos y su
apoyo constante e incondicional.



Resumen analítico - informativo

Modelación numérica de la cámara de carga y rápida hidráulica de la Central Hidroeléctrica de Curumuy

Sevilla Becerra, Carlomagno

Asesor(es): Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar

Tesis.

Ingeniero Civil

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, noviembre de 2020

Palabras claves: ANSYS CFX/ Modelación numérica/ Rápida hidráulica/ CFD.

Introducción: existe cierta complementariedad en el uso de los modelos físicos y numéricos para el diseño de estructuras hidráulicas. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal presentar la configuración adecuada de un modelo computacional de la rápida hidráulica de Curumuy; para su validación se tomará como referencia aforos efectuados a lo largo de la estructura.

Metodología: se realizó una visita de campo para conocer la estructura hidráulica. Después, se llevaron a cabo mediciones de velocidades y tirantes de agua a lo largo de la cámara de carga y rápida hidráulica, cuyos valores se contrastaron con los obtenidos de la modelación. De este proceso se obtuvo la configuración adecuada para este tipo de estructuras.

Resultados: se construyó y validó un modelo computacional de la rápida hidráulica de Curumuy utilizando el software ANSYS CFX. Las configuraciones realizadas captan los fenómenos hidráulicos producidos en estructuras hidráulicas de este tipo y permiten modelar flujos de superficie libre.

Conclusiones: de los contornos extraídos en la zona del resalto hidráulico se concluye que la configuración propuesta describe de manera cercana este fenómeno, dado que comparando los resultados de tirante y velocidades calculadas con los obtenidos de la modelación se obtuvo desviaciones bajas entre 0 y 16 %.

Fecha de elaboración del resumen: 10 de Noviembre del 2020.

Analytical - informative summary

Modelación numérica de la cámara de carga y rápida hidráulica de la Central Hidroeléctrica de Curumuy

Sevilla Becerra, Carlomagno

Asesor(es): Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar

Tesis.

Ingeniero Civil

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, noviembre de 2020

Keywords: ANSYS CFX / Numerical Modeling / Hydraulic Rapid / CFD

Introduction: There is some complementarity in the use of physical and numerical models for the design of hydraulic structures. The main objective of this research work is to show the appropriate configuration of a computational model of the Curumuy hydraulic system; for its validation it will be taken as a reference to the effects carried out along the structure.

Methodology: A field visit was made to learn about the hydraulic structure. Subsequently, measurements of velocities and water struts were carried out throughout the hydraulic loading and rapid chamber, the values of which were contrasted with those obtained from the modeling. The appropriate configuration for this type of structure was obtained from this process.

Results: In this research, a computational model of the Curumuy hydraulic rapid was constructed and validated using the ANSYS CFX software. The configurations made capture the hydraulic phenomena produced in hydraulic structures of this type and allow modeling free surface flows.

Conclusions: From the contours extracted in the area of the hydraulic ridge, it is concluded that the proposed configuration closely describes this phenomenon, since comparing the results of the tension and calculated speeds with those obtained from the modeling, low deviations between 0 and 16% were obtained.

Summary date: November 10th, 2020

Prefacio

Desde el 2003, el Perú ha duplicado su consumo energético, por ello al 2021 se proyectan inversiones por US\$ 3 755 millones en seis centrales hidroeléctricas y una central térmica en Pisco (Agencia Peruana de Noticias, 2018). Dentro de este contexto, para marzo del 2019, las centrales hidroeléctricas generaron 3.18 GWh de energía eléctrica, aprovechando los desniveles de agua para la generación de la misma, valor que resultó 5.8% mayor respecto al año 2018 (Agencia Peruana de Noticias, 2019). Por ello, se necesitarán nuevas centrales para la generación de energía y en consecuencia el posterior estudio en gabinete para evaluar su factibilidad.

Realizar los modelos físicos es una de las metodologías más usadas para tratar de conocer y comprender el comportamiento del agua y su interacción con las estructuras (Rocha, 2003). Esta metodología garantiza la visualización del comportamiento de la estructura en tres dimensiones, permitiendo observar y cuantificar fenómenos que se presentan en el flujo estudiado.

Por otra parte, es necesario la simulación numérica de fluidos cuya área de estudios es la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés, *Computational Fluid Dynamics*). Esta área es ampliamente utilizada en diferentes industrias y en la fabricación de centenares de productos. En hidráulica, la modelación numérica constituye una herramienta de gran utilidad para evaluar el comportamiento del fluido en una estructura, dado que complementa la metodología de los modelos físicos maximizando su relación costo - beneficio.

La realización de modelos numéricos se viene desarrollando mediante el uso de softwares como: ANSYS, TELEMAR, OpenFOAM, etc. De entre estos programas, ANSYS CFX presenta una mejor interfaz para la configuración de la simulación, la presentación de resultados en tres dimensiones y logra describir fenómenos hidráulicos complejos. Teniendo eso en cuenta, a través de esta investigación se plantea desarrollar una metodología de modelación numérica para el futuro diseño de las estructuras que comprenden una central hidroeléctrica, como son la cámara de carga y la rápida hidráulica, mediante el uso del software ANSYS CFX.

Para ello, se tomará como objeto de estudio la Central Hidroeléctrica de Curumuy, validando los resultados obtenidos de la modelación con las mediciones realizadas en campo.



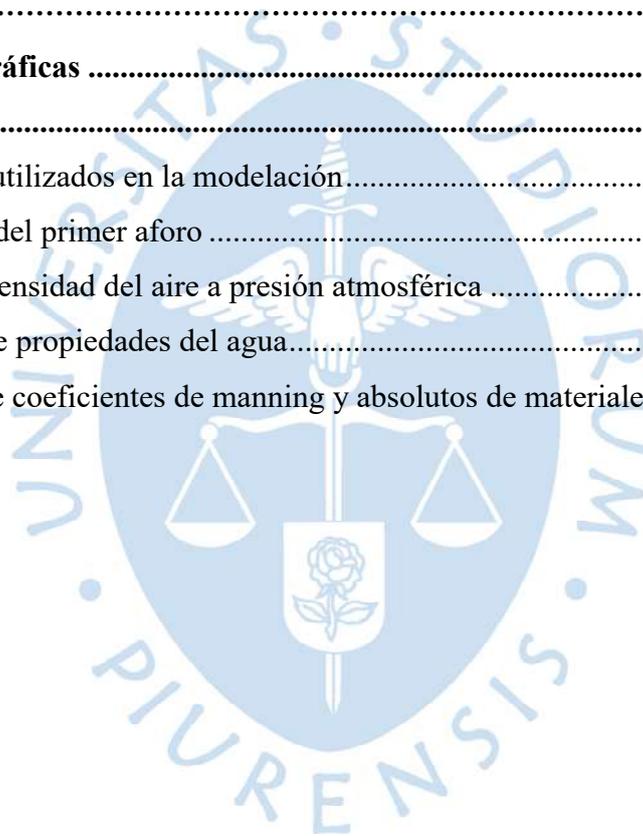
Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1 Marco teórico y conceptos generales	3
1.1. Bases teóricas	3
1.1.1. Canales abiertos.....	3
1.1.2. Flujo en canales abiertos	5
1.1.3. Número de Reynolds.....	7
1.1.4. Número de Froude.....	8
1.1.5. Ecuación de continuidad	9
1.1.6. Ecuación de energía	9
1.1.7. Ecuación de cantidad de movimiento.....	11
1.1.8. Rápidas hidráulicas	11
1.1.8.1. Definición	12
1.1.8.2. Componentes de una rápida hidráulica	12
1.1.8.3. Conceptos de diseño	13
1.1.9. Cámara de carga	13
1.1.9.1. Definición	13
1.2. Conceptos teóricos.....	14
Capítulo 2 Métodos numéricos y dinámica computacional.....	17
2.1. Dinámica de fluidos computacional	17
2.1.1. Ventajas y desventajas	17
2.1.2. Introducción a los métodos numéricos.....	18
2.1.3. Componentes de un método de solución numérica.....	19
2.1.4. Comportamiento básico de los fluidos	21
2.1.5. Mecánica de fluidos y principios de conservación.....	22
2.1.5.1. Ley de la conservación.....	22
2.1.5.2. Ley de la conservación de la Masa	24
2.1.5.3. Ley de la conservación de la Momentum	25

2.1.5.4.	Ecuación de Navier Stokes	26
2.1.6.	Modelos matemáticos simplificados	28
2.1.6.1.	Fluidos incompresibles	28
2.1.6.2.	Aproximación de capa límite	29
2.1.6.3.	Modelado de fenómenos de flujo complejo.....	29
2.1.7.	Modelos de turbulencia	30
2.1.7.1.	Turbulencia	30
2.1.7.2.	Características	30
2.1.7.3.	Turbulencia en CFD.....	31
2.2.	ANSYS CFX	32
2.2.1.	Estructura de modelación.....	33
2.2.2.	Geometría	36
2.2.3.	Mallado.....	36
2.2.3.1.	Tipos de mallado.....	37
2.2.3.2.	Parámetros de calidad de mallado.....	39
2.2.4.	Método numérico	41
2.2.4.1.	Método de volúmenes finitos.....	41
2.2.4.2.	Ecuaciones de conservación	42
2.2.5.	Modelos de turbulencia	43
2.2.6.	Modelos multifase	45
2.2.7.	Flujos en superficie libre	45
2.2.8.	Tipos de análisis	47
2.2.8.1.	Simulaciones de estado estacionario.....	47
2.2.8.2.	Simulaciones transitorias	48
2.2.9.	Criterios de convergencia.....	50
2.2.10.	Conceptos teóricos	52
Capítulo 3 Rápida hidráulica de Curumuy y generación de su geometría.....		55
3.1.	Central Hidroeléctrica de Curumuy.....	55
3.1.1.	Ubicación y objetivo	55
3.1.2.	Características de la central hidroeléctrica de Curumuy.....	56
3.1.3.	Descripción de la obra.....	57
3.2.	Rápida hidráulica de Curumuy	59
3.2.1.	Objetivos	60
3.2.2.	Descripción de la obra.....	60

3.3.	Modelado en 3D de la cámara de carga y rápida hidráulica.....	62
3.3.1.	Herramientas de modelado.....	62
3.3.2.	Planos utilizados.....	64
3.3.3.	Herramientas utilizadas.....	64
Capítulo 4	Recolección de datos.....	69
4.1.	Métodos de aforo.....	69
4.1.1.	Volumétrico.....	69
4.1.2.	Vertedor.....	70
4.1.3.	Flotador.....	71
4.1.4.	Correntómetro.....	72
4.1.5.	Selección del sitio.....	74
4.1.6.	Velocidad superficial.....	75
4.2.	Aforos realizados.....	76
4.2.1.	Equipo.....	77
4.2.2.	Limitaciones presentadas.....	77
4.2.3.	Primer aforo.....	79
4.2.4.	Segundo aforo.....	81
4.2.5.	Tercer aforo.....	81
Capítulo 5	Simulación numérica del proyecto.....	83
5.1.	Metodología utilizada.....	83
5.2.	Bocatoma y cámara de carga.....	84
5.2.1.	Diseñar y crear la malla.....	86
5.2.1.1.	Análisis transitorio.....	87
5.2.1.2.	Análisis estacionario.....	92
5.2.2.	Definición de la física del modelo.....	93
5.2.2.1.	Expresiones.....	95
5.2.2.2.	Análisis transitorio.....	98
5.2.2.3.	Análisis estacionario.....	118
5.2.3.	Calcular la solución.....	121
5.2.3.1.	Análisis transitorio.....	124
5.2.3.2.	Análisis estacionario.....	127
5.2.4.	Visualización y análisis de los resultados.....	131
5.3.	Rápida hidráulica.....	140
5.3.1.	Diseñar y crear la malla.....	141

5.3.2. Definición de la física del modelo.....	144
5.3.3. Calcular la solución.....	150
Capítulo 6 Resultados.....	153
6.1. Tirantes y velocidades analíticos.....	153
6.2. Líneas de corriente.....	155
6.3. Resalto hidráulico.....	157
6.4. Velocidades.....	159
6.5. Superficie libre.....	166
Conclusiones.....	167
Recomendaciones.....	169
Referencias bibliográficas.....	171
Anexos.....	175
Anexo A - Planos utilizados en la modelación.....	175
Anexo B - Caudal del primer aforo.....	183
Anexo C – Tabla densidad del aire a presión atmosférica.....	184
Anexo D - Tabla de propiedades del agua.....	185
Anexo E - Tabla de coeficientes de manning y absolutos de materiales.....	186





Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de flujo.	6
Tabla 2. Factor de corrección de velocidad, C.	71
Tabla 3. Profundidades de lectura del correntómetro.	72
Tabla 4. Elementos geométricos y parámetros hidráulicos.	80
Tabla 5. Resumen datos primer aforo.	80
Tabla 6. Segundo aforo. Velocidades en coordenadas absolutas.	81
Tabla 7. Datos método del flotador.	82
Tabla 8. Resumen datos mallado 1.	92
Tabla 9. Resumen datos de mallado 2.	93
Tabla 10. Expresiones de la modelación.	97
Tabla 11. Datos de condición de frontera ENTRADA.	104
Tabla 12. Datos de condición de frontera FONDO.	105
Tabla 13. Datos de condición de frontera PAREDES.	106
Tabla 14. Datos de condición de frontera SALIDA.	106
Tabla 15. Datos de condición de frontera SUPERFICIE LIBRE.	107
Tabla 16. Resumen de parámetros físicos de condiciones de frontera – análisis transitorio.	117
Tabla 17. Resumen de parámetros físicos del dominio – análisis transitorio.	118
Tabla 18. Resumen de parámetros físicos del dominio – análisis estacionario.	120
Tabla 19. Resumen de parámetros físicos de condiciones de frontera – análisis estacionario.	121
Tabla 20. Tirantes en contorno 1.	135
Tabla 21. Velocidades en contorno 1.	136
Tabla 22. Parámetros hidráulicos para contorno 3 en análisis transitorio.	137
Tabla 23. Parámetros hidráulicos para contorno 3 en análisis estacionario.	137
Tabla 24. Resumen datos de mallado 3.	143
Tabla 25. Resumen de parámetros físicos del dominio en la rápida hidráulica.	147

Tabla 26. Resumen de parámetros físicos de condiciones de frontera en la rápida hidráulica.	148
Tabla 27. Datos iniciales y en los puntos de cálculo.....	153
Tabla 28. Resultados de tirantes y velocidades de agua en la rápida hidráulica.	154
Tabla 29. Resumen de resultados de tirantes y velocidades.....	166



Lista de figuras

Figura 1. Secciones transversales de canales abiertos más frecuentes.....	3
Figura 2. Elementos geométricos de la sección transversal de un canal.....	4
Figura 3. Área hidráulica.....	4
Figura 4. Perímetro mojado.....	4
Figura 5. Comparación entre flujo en tuberías y flujo en canales abiertos.	5
Figura 6. Flujo uniforme.	5
Figura 7. Flujo uniforme no permanente.....	6
Figura 8. Flujo variado permanente.	7
Figura 9. Flujo variado no permanente.	7
Figura 10. Tipos de flujo en canales abiertos.....	9
Figura 11. Energía total en la sección de un canal.....	10
Figura 12. Energía total en el punto 1 y punto 2.....	11
Figura 13. Elementos de una rápida.....	12
Figura 14. Arreglos de obras de puesta a presión.....	14
Figura 15. Presión absoluta, manométrica y de vacío.....	15
Figura 16. Líneas de corriente.....	16
Figura 17. Elemento de un fluido.....	25
Figura 18. Regímenes de flujo. a) Laminar, b) Transición y c) Turbulento.	30
Figura 19. Flujo de datos ANSYS CFX.....	33
Figura 20. Dominio de interés.....	34
Figura 21. Tipos de elementos en una malla.....	36
Figura 22. Remallado en el flujo de trabajo.....	37
Figura 23. Malla no estructurada.	38
Figura 24. Malla estructurada.	38
Figura 25. Malla mixta.....	39
Figura 26. Cálculo de la relación de aspecto en una celda.....	40
Figura 27. Vectores utilizados para calcular la ortogonalidad.....	40

Figura 28. Definición de volumen de control.	41
Figura 29. Refinamiento de mallado en superficie libre.	46
Figura 30. Time step en análisis transitorios.	49
Figura 31. Parámetros de un análisis transitorio.	50
Figura 32. Evolución de residuales (Buena convergencia).	51
Figura 33. Evolución de puntos de monitoreo.	52
Figura 34. Vista panorámica de CH Curumuy.	55
Figura 35. Ubicación central hidroeléctrica de Curumuy.	56
Figura 36. Bocatoma de la CH de Curumuy.	57
Figura 37. Vista posterior bocatoma y compuertas de mantenimiento.	57
Figura 38. Cámara de carga de CH de Curumuy.	58
Figura 39. Elementos que conformar la central hidroeléctrica.	59
Figura 40. Rápida hidráulica de la central hidroeléctrica de Curumuy.	59
Figura 41. Transición de entrada de la rápida hidráulica.	60
Figura 42. Secciones transversales de la transición de la rápida.	60
Figura 43. Segundo tramo del canal de rápida.	61
Figura 44. Elementos de la rápida hidráulica de la central hidroeléctrica de Curumuy.	61
Figura 45. Croquizado en 2D y extrusión.	63
Figura 46. Herramientas de croquis.	63
Figura 47. Herramientas de operaciones en 3D.	64
Figura 48. Operaciones de superficie.	64
Figura 49. Geometría canal de derivación Daniel Escobar y rápida hidráulica.	65
Figura 50. Datos de disipación y vertedero.	66
Figura 51. Geometría de Bocatoma y Cámara de Carga.	66
Figura 52. Simplificaciones de la geometría.	67
Figura 53. Dominio de la estructura estudiada.	68
Figura 54. Aforo volumétrico.	70
Figura 55. Aforo vertedor.	70
Figura 56. Aforo con flotador.	71
Figura 57. Secciones parciales de un cauce.	73
Figura 58. Distribución de velocidad para diferentes secciones transversales.	75
Figura 59. Perfil de velocidad en un canal abierto.	75
Figura 60. Ubicación de aforos realizados.	76
Figura 61. Contador y molinete universal OTT C31.	77

Figura 62. Fluencia vehicular en primer aforo.....	78
Figura 63. Segundo aforo.....	78
Figura 64. Recirculación de flujo.....	79
Figura 65. Tercer aforo. Método del flotador.	79
Figura 66. Secciones parciales de primer aforo.	80
Figura 67. Aforos dentro de la central de Curumuy.....	81
Figura 68. Interfaz <i>Workbench</i>	84
Figura 69. Geometría de bocatoma y cámara de carga importada a <i>DESIGN MODELER</i>	85
Figura 70. Verificación de geometría.....	85
Figura 71. Condiciones de frontera definidas en Bocatoma y cámara de carga.	86
Figura 72. Opciones de mallado.....	86
Figura 73. Configuración primer mallado.....	87
Figura 74. <i>Body Sizing</i>	87
Figura 75. <i>Face Sizing</i>	88
Figura 76. <i>Refinement</i>	88
Figura 77. Selección de parámetros de calidad de malla.	89
Figura 78. Características de calidad de elementos - mallado 1.	90
Figura 79. Características de aspecto del elemento - mallado 1.	90
Figura 80. Características de oblicuidad - mallado 1.	90
Figura 81. Características de ortogonalidad - mallado 1.....	91
Figura 82. Primer mallado.....	91
Figura 83. Configuración de segundo mallado.	92
Figura 84. Vista preliminar del <i>Setup</i>	94
Figura 85. Configuración del <i>Setup</i>	95
Figura 86. Ingreso de expresiones.....	96
Figura 87. Recorrido promedio de una partícula en el dominio.	98
Figura 88. Consideraciones para análisis transitorio.....	99
Figura 89. Configuración de fluidos en el dominio.	99
Figura 90. Configuraciones básicas del dominio.	100
Figura 91. Configuraciones de modelos de fluidos.....	101
Figura 92. Configuraciones de modelos de fluido específicas.....	102
Figura 93. Configuraciones de modelos de par de fluido.	102
Figura 94. Insertar condiciones de frontera.....	103
Figura 95. Condición de frontera: ENTRADA.	104

Figura 96. Condición de frontera: FONDO.	105
Figura 97. Condición de frontera: PAREDES.	105
Figura 98. Condición de frontera: SALIDA.	106
Figura 99. Condición de frontera: SUPERFICIE LIBRE.	107
Figura 100. Condiciones de frontera en dominio.	108
Figura 101. Configuración de unidades de solución.	108
Figura 102. Configuración de <i>Solver Control</i>	109
Figura 103. Configuración de <i>Output Control</i>	111
Figura 104. Expresión como punto de monitoreo.	112
Figura 105. Punto de monitoreo como coordenada cartesiana.	113
Figura 106. Punto de monitoreo como coordenada cilíndrica.	113
Figura 107. Primer y segundo punto de monitoreo.	114
Figura 108. Puntos de monitoreo en coordenadas absolutas.	115
Figura 109. Ubicación de puntos de monitoreo.	115
Figura 110. Condiciones de inicialización.	116
Figura 111. Configuración de tipo de análisis – estacionario.	118
Figura 112. Adaptación de malla.	119
Figura 113. Controles de convergencia en análisis estacionario.	120
Figura 114. Opciones de la herramienta <i>Solution</i>	122
Figura 115. Vista preliminar <i>Solution</i>	122
Figura 116. Zonas del solucionador de ANSYS CFX.	123
Figura 117. Creación de nuevas ventanas de monitoreo.	124
Figura 118. Residuales promedios de análisis transitorio.	124
Figura 119. Turbulencia de análisis transitorio.	125
Figura 120. Puntos de monitoreo de análisis transitorio.	125
Figura 121. Imbalances de análisis transitorio.	126
Figura 122. Parámetros mostrados en el <i>Solver</i> – Análisis transitorio.	127
Figura 123. Residuales promedios de análisis estacionario.	128
Figura 124. Puntos de monitoreo de análisis estacionario.	128
Figura 125. Imbalances de análisis estacionario.	129
Figura 126. Procedimiento para visualizar últimas iteraciones.	129
Figura 127. Imbalances en las últimas 100 iteraciones.	130
Figura 128. Parámetros mostrados en el <i>Solver</i> – Análisis estacionario.	130
Figura 129. Opciones de la herramienta <i>Results</i>	131

Figura 130. Vista preliminar complemento <i>Results</i>	131
Figura 131. Planos de referencia para contornos.	132
Figura 132. Ubicación de planos en dominio.....	132
Figura 133. Configuración de contornos creados.	133
Figura 134. Ubicación de contornos en el dominio.	133
Figura 135. Herramienta <i>Probe</i>	134
Figura 136. Puntos de medición en contorno 1.....	135
Figura 137. Puntos de medición en contorno 3.....	136
Figura 138. Creación de <i>Iso</i> surface.	138
Figura 139. Flujo de agua en vertedero lateral.....	138
Figura 140. <i>Iso</i> surfaces de los análisis transitorio y estacionario.	139
Figura 141. Fotografías de la caída de agua desde el vertedero lateral.....	139
Figura 142. Refinamiento de mallado en el dominio con <i>Mesh Adaption</i>	140
Figura 143. Dominio dividido en el software SolidWorks.	140
Figura 144. Geometría de rápida hidráulica importada a <i>DESIGN MODELER</i>	141
Figura 145. Condiciones de frontera definidas en la rápida hidráulica.....	141
Figura 146. Sólidos en complemento <i>Meshing</i>	142
Figura 147. Métodos de mallado.....	142
Figura 148. Detalles de métodos de mallado.	143
Figura 149. Configuración de mallado para rápida hidráulica.....	143
Figura 150. Mallado de la rápida hidráulica.	144
Figura 151. Exportar perfil de velocidad.	144
Figura 152. Exportación de variables físicas de salida.	145
Figura 153. Perfil de velocidad en formato .csv.	145
Figura 154. Inicializar perfil de data.	146
Figura 155. Ingresando perfil de velocidad al CFX Pre.....	146
Figura 156. Configuración de la condición de frontera de entrada en la rápida hidráulica. .	147
Figura 157. Puntos de monitoreo en la rápida hidráulica.....	149
Figura 158. Puntos de monitoreo en la rápida hidráulica.....	149
Figura 159. Condiciones de inicialización en la rápida hidráulica.	150
Figura 160. Residuales promedios de la rápida hidráulica.	150
Figura 161. Imbalances de la rápida hidráulica.	151
Figura 162. Puntos de monitoreo en la rápida hidráulica.....	151
Figura 163. Parámetros mostrados en el <i>Solver</i> en la rápida hidráulica.	152

Figura 164. Geometría de la rápida hidráulica y puntos de cálculo.....	154
Figura 165. Tirantes de agua a lo largo de la rápida hidráulica.	155
Figura 166. Líneas de corriente en complemento <i>Results</i>	155
Figura 167. Líneas de corriente en <i>outline</i> del CFX <i>Post</i>	156
Figura 168. Líneas de corriente en la rápida hidráulica.	156
Figura 169. Contornos para análisis de resalto hidráulico.	157
Figura 170. Comparación de resalto hidráulico con contornos.....	158
Figura 171. Contorno 5 en punto 1 de variable volumen de fracción de agua.	159
Figura 172. Contorno 6 en punto 1 de variable velocidad del agua.....	159
Figura 173. Creación de plano 5 en CFX <i>Post</i>	160
Figura 174. Contorno 7 en punto 2 de volumen de fracción de agua.	160
Figura 175. Contorno 8 en punto 2 de velocidad del agua.....	161
Figura 176. Contorno 9 en punto 3 de volumen de fracción de agua.	161
Figura 177. Contorno 10 en punto 3 de velocidad del agua.....	162
Figura 178. Contorno 11 en punto 4 de volumen de fracción de agua.	162
Figura 179. Contorno 12 en punto 4 de velocidad del agua.....	162
Figura 180. Contorno 13 en fin del resalto hidráulico de volumen de fracción de agua.	163
Figura 181. Contorno 14 en fin del resalto hidráulico de velocidad del agua.	163
Figura 182. Contorno 15 en punto 5 de volumen de fracción de agua.	164
Figura 183. Contorno 16 en punto 5 de velocidad del agua.....	164
Figura 184. Contorno 17 en punto 6 de volumen de fracción de agua.	165
Figura 185. Contorno 18 en punto 6 de velocidad del agua.....	165
Figura 186. Isosuperficie de rápida hidráulica en función de velocidad del agua.	166

Introducción

En los últimos años, la implementación del software ANSYS para las modelaciones hidráulicas en todo el mundo ha incrementado notablemente. Para su uso se requiere seguir una serie de pasos y se debe estudiar detalladamente cada uno de estos para obtener los mejores resultados. La investigación que se realizará plantea un análisis numérico de la cámara de carga y la rápida hidráulica de Curumuy haciendo uso del software ANSYS, en los dos casos se tomarán mediciones en las estructuras para contrastarlas con los resultados obtenidos en el modelo.

La Central Hidroeléctrica de Curumuy se encuentra ubicada en el departamento de Piura, localidad de San Juan de Curumuy, al final del canal de derivación “Daniel Escobar”, donde este descarga sus aguas hacia el río Piura mediante una “caída rápida” conocida localmente como Caída Curumuy. Esta caída se aprovecha para generar energía, desviando las aguas del canal hacia una cámara de carga construida paralelamente (Sinersa Perú, s.f.).

Realizando una correcta calibración del modelo y teniendo una buena comprensión del software; se tiene como objetivo general presentar la configuración adecuada de un modelo computacional de la rápida de Curumuy. El cual servirá para posteriores estudios de estructuras hidráulicas similares.

Además, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar información sobre rápidas hidráulicas y centrales hidroeléctricas.
- Conocer las estructuras hidráulicas diseñadas para el funcionamiento de la central hidroeléctrica de Curumuy.
- Estudiar las bases teóricas de la modelación numérica y la dinámica de fluidos computacional.
- Explicar el manejo de SolidWorks para la modelación en 3D de la geometría que presenta la estructura estudiada.
- Realizar la modelación numérica de la rápida hidráulica y presentar una comparación de la desviación porcentual de resultados respecto a las mediciones en campo en función entre ambas.



Capítulo 1

Marco teórico y conceptos generales

1.1. Bases teóricas

En esta sección se detallarán los conceptos hidráulicos usados para definir el tipo de flujo en la estructura que se modelará y conceptos hidráulicos usados por el software ANSYS CFX.

1.1.1. Canales abiertos

Los canales son conductos por los que circula agua debido a la acción de la gravedad, pueden ser naturales como ríos o arroyos y artificiales como bocatomas y presas (Villón, 2007). Los canales artificiales se diseñan con formas geométricas regulares como triangulares, rectangulares o trapezoidales (Figura 1).

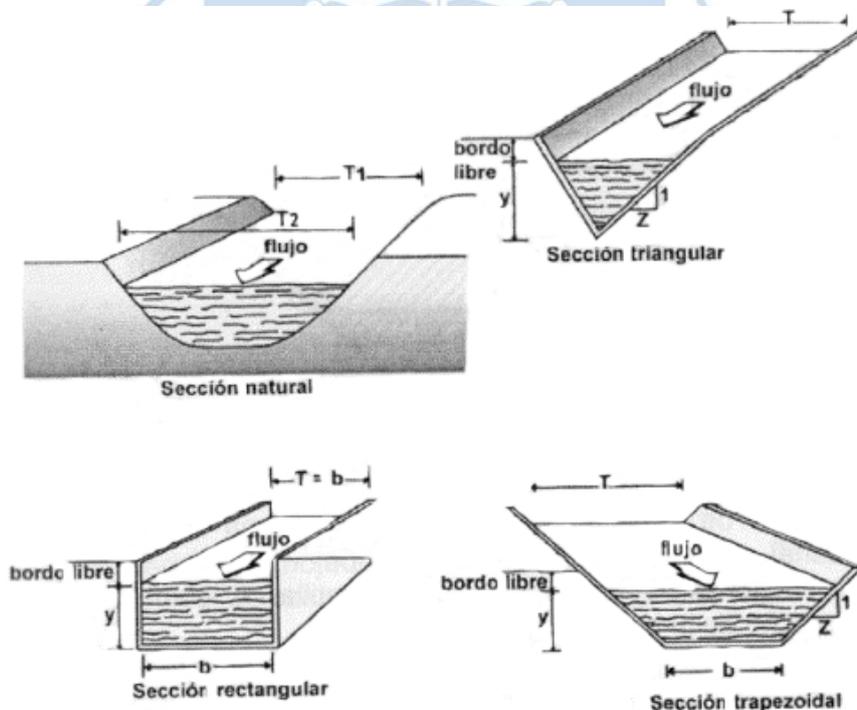


Figura 1. Secciones transversales de canales abiertos más frecuentes.

Fuente: Villón, 2007.

Según Villón (2007) los elementos geométricos de un canal (Figura 2) son:

- Tirante de agua (y): es la profundidad de agua en el canal.

- Ancho de solera (b): es el ancho base del canal.
- Espejo de agua (T): es el ancho de la superficie libre del agua.
- Ancho de corona (C)
- Profundidad total del canal (H)
- Borde libre (H - y)
- Ángulo de inclinación de las paredes laterales (Θ)
- Talud (Z): es la relación de la proyección horizontal a la vertical de la pared lateral.

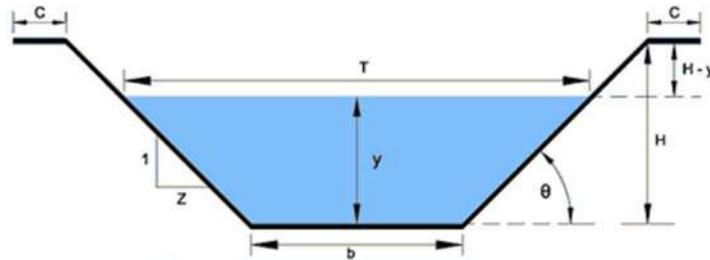


Figura 2. Elementos geométricos de la sección transversal de un canal.

Fuente: Villón, 2007.

- Área hidráulica (A): superficie ocupada por el líquido en una sección transversal normal del canal (Figura 3).

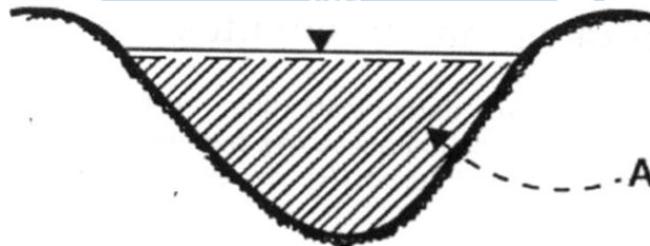


Figura 3. Área hidráulica.

Fuente: Villón, 2007.

- Radio hidráulico (R): dimensión característica de la sección transversal. Responde a la formulación de la Ecuación 1 - 1.

$$R = \frac{A}{p} \quad \text{Ecuación 1 - 1}$$

- Périmetro mojado (p): contorno del canal que está en contacto con el fluido (Figura 4).

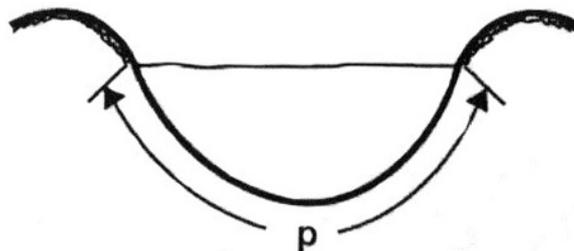


Figura 4. Périmetro mojado.

Fuente: Villón, 2007.

1.1.2. Flujo en canales abiertos

El flujo en canales abiertos presenta una superficie libre, que constituye el límite entre las fases aire y agua. Además, están bajo la influencia de la presión atmosférica. Por otra parte, existen los flujos en tuberías que no poseen una superficie libre como se muestra en la Figura 5 (Chow, 1994).

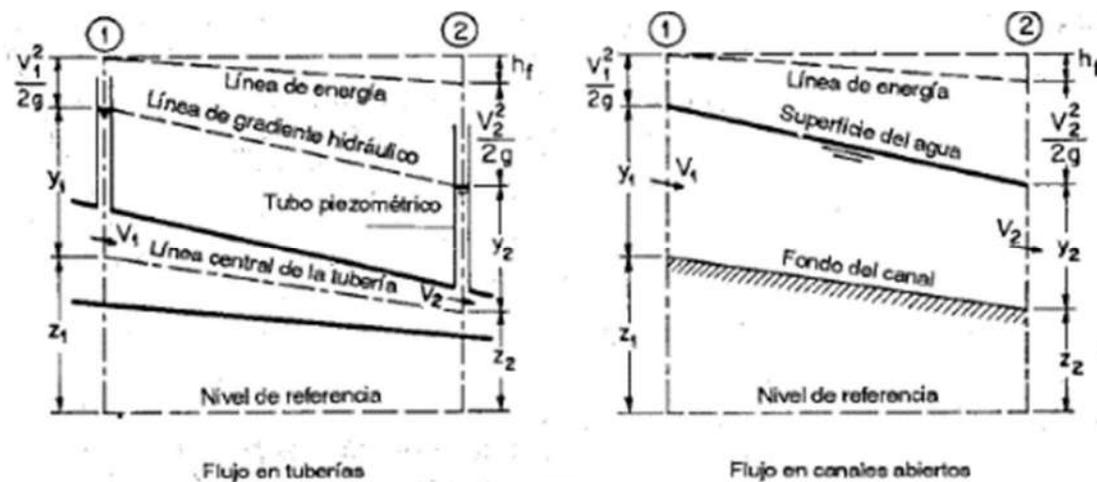


Figura 5. Comparación entre flujo en tuberías y flujo en canales abiertos.

Fuente: Chow, 1994.

Acorde a Chow (1994), las condiciones de flujo en canales abiertos se complican con el hecho de que la posición de la superficie libre puede variar con el tiempo y el espacio, por esta razón es muy difícil obtener datos experimentales confiables. Otro aspecto importante a considerar en su estudio es la elección de los coeficientes de fricción, dado que presentan cierta incertidumbre. Según Chow (1994) se puede clasificar el flujo acorde a la variación de su profundidad en función de tiempo y espacio. Se distinguen dos tipos:

- **Flujo permanente:** permanecen constantes las características hidráulicas del flujo, tales como caudal, velocidad media y tirante en cada sección del mismo. Además, puede ser uniforme o variado:

Flujo uniforme permanente: el tirante del flujo no presenta cambios a lo largo del canal en el intervalo de tiempo considerado para su estudio, como se detalla en Figura 6.

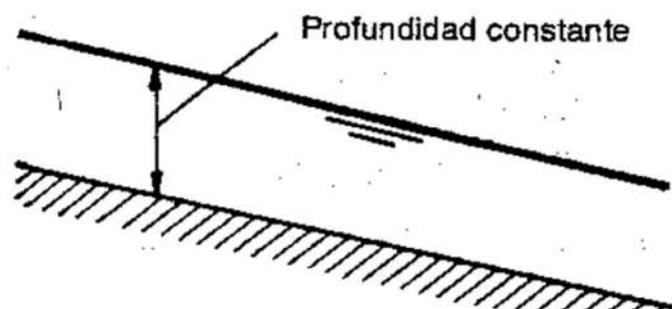


Figura 6. Flujo uniforme.

Fuente: Chow, 1994.

Flujo variado permanente: cambia su tirante a lo largo del canal pero se siguen manteniendo constantes sus características hidráulicas en cada sección.

- **Flujo no permanente:** el comportamiento del fluido tiene variaciones importantes a lo largo del tiempo. Además, en cada sección del canal no permanecen constantes las características hidráulicas del mismo. Un flujo no permanente puede ser:

Flujo uniforme no permanente: requiere que la superficie de agua o espejo de agua cambie de un instante a otro, pero permaneciendo paralelo al fondo del canal. Esta condición nunca se presenta dado que es imposible (Figura 7).

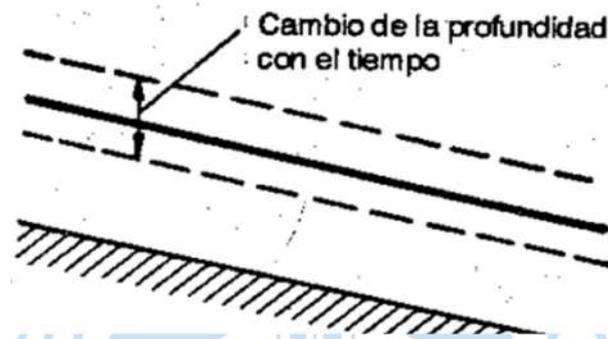


Figura 7. Flujo uniforme no permanente.

Fuente: Chow, 1994.

Flujo variado no permanente: cambia su tirante a lo largo del canal y no se mantienen constantes sus características hidráulicas en cada sección. Es un tipo de flujo poco frecuente.

Dentro de los flujos variados tanto permanente y no permanente. Se distinguen según Chow (1994):

- **Flujo gradualmente variado:** se da cuando cambia el tirante en largas distancias como en canales y presas.
- **Flujo rápidamente variado:** el tirante de agua cambia abruptamente en distancias cortas. Ejemplo: resalto hidráulico y la caída hidráulica.

La clasificación se resume en la Tabla 1, además se puede apreciar algunos casos en Figura 8 y Figura 9.

Tabla 1. Tipos de flujo.

Flujo permanente	Flujo uniforme permanente	
	Flujo variado permanente	Flujo gradualmente variado permanente (F.G.V)
		Flujo rápidamente variado permanente (F.R.V.)
Flujo no permanente	Flujo uniforme no permanente (raro)	
	Flujo variado no permanente (raro)	Flujo gradualmente variado no permanente
		Flujo rápidamente variado no permanente

Fuente: Chow, 1994.

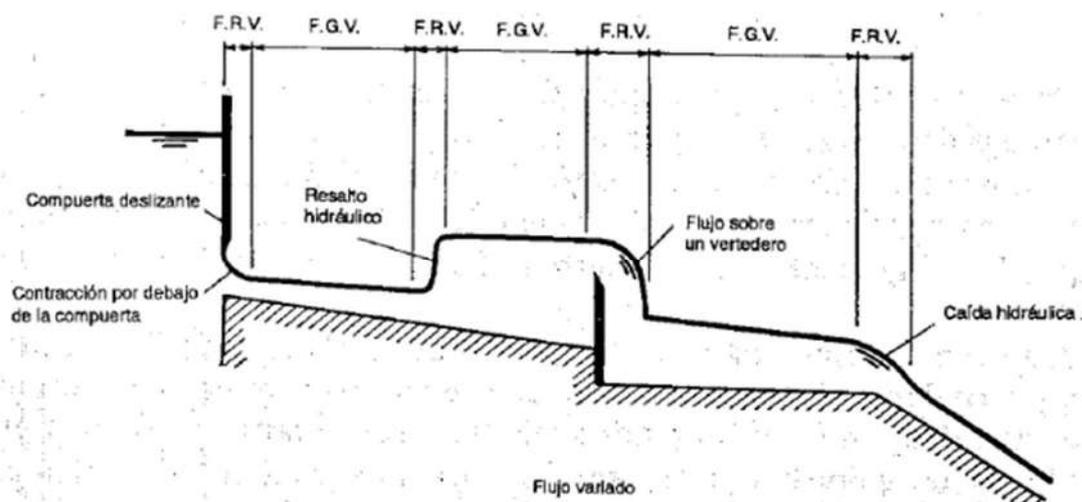


Figura 8. Flujo variado permanente.

Fuente: Chow, 1994.

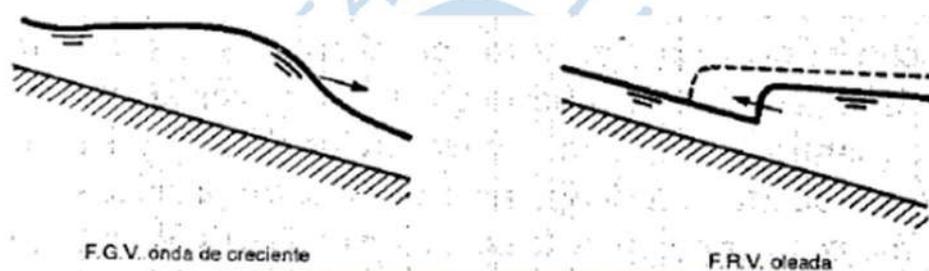


Figura 9. Flujo variado no permanente.

Fuente: Chow, 1994.

1.1.3. Número de Reynolds

El comportamiento del flujo en canales abiertos está regido por los efectos de la viscosidad y la fuerza de la gravedad en relación con las fuerzas inerciales del mismo (Chow, 1994). Para caracterizar al fluido dentro de alguno de estos tipos se necesita calcular el número de Reynolds a través de la Ecuación 1 – 2.

$$R_e = \frac{V * L}{\nu} \quad \text{Ecuación 1 – 2}$$

Donde:

V: velocidad del flujo

L: longitud característica

ν : viscosidad cinemática del agua

La viscosidad cinemática se encuentra mediante la siguiente formulación:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ecuación 1 - 3}$$

μ : viscosidad dinámica

ρ : densidad

Para el agua a 20°C: $\mu = 1.01 \times 10^{-3} \text{ (N * s)/m}^2$ y $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$; entonces su viscosidad cinemática es $\nu = 1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Según el efecto de la viscosidad definida por el número de Reynolds (R_e), Chow (1994) distingue los siguientes tipos de flujos:

- a. **Laminar:** en este tipo de flujo las líneas de corriente se mueven en trayectorias suaves, siendo las fuerzas viscosas más fuertes respecto a las fuerzas inerciales. Su valor de Reynolds es $R_e < 2000$.
- b. **Transicional:** es el estado mixto entre el flujo laminar y turbulento. Para este tipo se cumple que: $2000 < R_e < 4000$.
- c. **Turbulento:** si las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales se produce este tipo de flujo, y se presentan las líneas de corriente con trayectorias irregulares. Su número de Reynolds es $R_e > 4000$.

En casos raros se presentan flujos laminares en canales debido a la baja viscosidad cinemática del agua.

1.1.4. Número de Froude

El número de Froude evalúa el efecto de la gravedad sobre el estado del flujo (Ecuación 1 – 4), según el cual, el flujo puede ser de los siguientes tipos: crítico, sub crítico y supercrítico (Chow, 1994).

$$F = \frac{v}{\sqrt{g * L}} \quad \text{Ecuación 1 – 4}$$

Donde:

L: longitud característica de la sección (m)

g: aceleración de la gravedad (m/s^2)

v: velocidad media de la sección (m)

En el flujo en canales abiertos, la longitud característica es igual a la profundidad hidráulica D, la cual es igual al área hidráulica entre el espejo de agua. Por tanto, la Ecuación 1 – 4 resulta:

$$F = \frac{v}{\sqrt{g * \frac{A}{T}}} \quad \text{Ecuación 1 – 5}$$

T: espejo de agua (m)

A: área hidráulica (m^2)

Acorde a este valor adimensional Villón (2007) distingue los siguientes tipos de flujo (Figura 10):

- a. **Flujo subcrítico ($F < 1$):** el flujo tiene velocidades bajas y es tranquilo y lento porque la fuerza de la gravedad es dominante.
- b. **Flujo crítico ($F = 1$):** fuerzas de inercia y de gravedad están en equilibrio.
- c. **Flujo supercrítico ($F > 1$):** en este estado las fuerzas de inercia son mas pronunciadas, por esto el flujo es rápido y torrencioso.

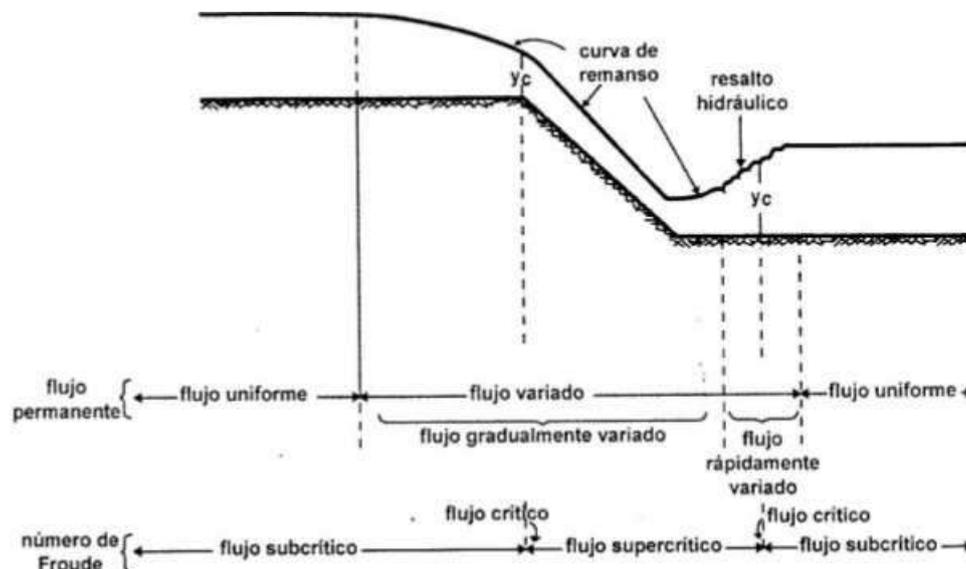


Figura 10. Tipos de flujo en canales abiertos.

Fuente: Villón, 2007.

1.1.5. Ecuación de continuidad

Ecuación que gobierna el flujo desde el enfoque de la conservación de la masa (Ecuación 1 – 6), se da cuando se presenta un caudal constante en un tramo (Villón, 2007).

Esta ecuación se cumple para flujos que presentan un caudal constante a lo largo del canal y son llamados continuos permanentes. No cumple cuando entra o sale agua a lo largo del tramo estudiado dado que se varía el caudal (Chow, 1994). Además, se asume que el fluido es homogéneo e incompresible.

$$Q = v * A \quad \text{Ecuación 1 – 6}$$

Donde:

v: velocidad media de la sección (m/s)

A: área hidráulica (m²)

Q: caudal (m³/s)

1.1.6. Ecuación de energía

Para el planteamiento de esta ecuación (Ecuación 1 – 7); se asumen las siguientes hipótesis (Naudascher, 1994):

- El fluido es homogéneo e incompresible.
- El flujo es estacionario y la presión en cualquier punto no varía en el tiempo.
- Solo la gravedad y presión tienen influencia sobre el flujo, no se consideran los efectos de la viscosidad. Por lo tanto, esta ecuación tiene validez cuando las pérdidas de energía por viscosidad son insignificantes.
- Presentan una distribución de presión hidrostática a lo largo de las secciones transversales estudiadas.

Partiendo de estas hipótesis, la ecuación de la energía plantea que cualquier línea de corriente que atraviesa la sección de un canal posee una energía total, mostrada en la Figura 11, que es la suma de la energía potencial, de presión y de velocidad (Villón, 2007).

$$Energía_{Total} = E_{potencial} + E_{presión} + E_{velocidad}$$

$$E_T = Z + y + \alpha * \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1 - 7}$$

Donde:

Z: altura de posición

y: altura de presión

E_T : altura total de energía

$\alpha * \frac{v^2}{2g}$: altura de velocidad

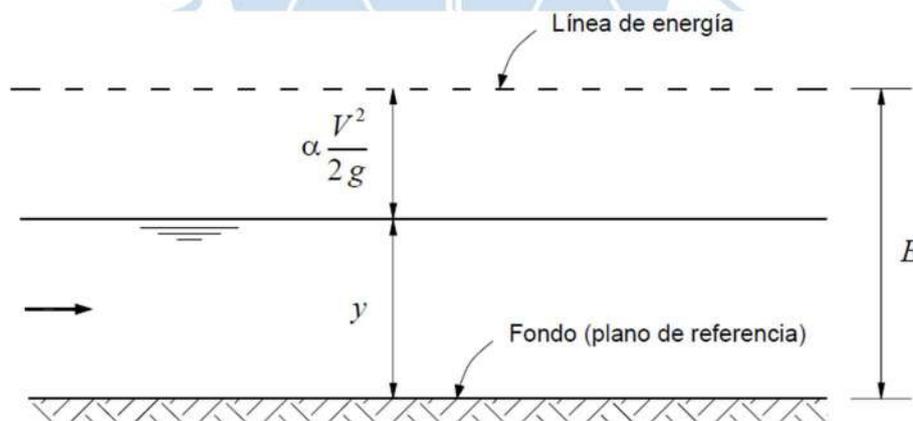


Figura 11. Energía total en la sección de un canal.

Fuente: Rocha, Hidraulica de Canales, 2007.

El término α de la ecuación 1 - 7, se da debido a que la velocidad no se distribuye uniformemente en la sección transversal. Por lo tanto, para una velocidad constante el valor de α es 1 (Naudascher, 1994). Los ensayos experimentales muestran que α varía de 1.03 a 1.36 para los canales prismáticos. El valor de este coeficiente depende de la exactitud que se necesite en nuestros cálculos, por lo que se justifica asumir un valor de 1 en muchos casos (Villón, 2007).

En flujos en canales abiertos siempre hay una pérdida de energía entre un punto y otro debido a que es transformada en calor por la fricción que existe entre el agua y las paredes del canal, como se muestra en la Figura 12 (Villón, 2007). Entonces a la ecuación de energía se suma el término h_f , que representa las pérdidas de energía entre los puntos 1 y 2, como lo detalla la Ecuación 1 – 8.

$$Z_1 + y_1 + \alpha * \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \alpha * \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad \text{Ecuación 1 – 8}$$

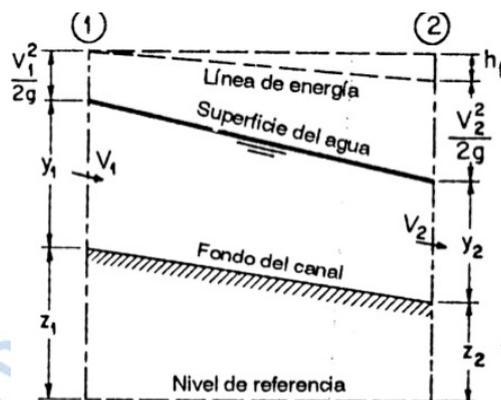


Figura 12. Energía total en el punto 1 y punto 2.

Fuente: Chow, 1994.

1.1.7. Ecuación de cantidad de movimiento

Ecuación del impulso o cantidad de movimiento se basa en la segunda ley de Newton que nos dice que “La suma de las fuerzas exteriores es igual al cambio de la cantidad de movimiento”, esto se detalla en la Ecuación 1 – 9.

$$\frac{Q^2}{g * A_1} + \bar{y}_1 * A_1 = \frac{Q^2}{g * A_2} + \bar{y}_2 * A_2 \quad \text{Ecuación 1 – 9}$$

Donde:

Q: caudal

A: área hidráulica en la sección de análisis

g: aceleración de la gravedad

\bar{y}_n : altura medida desde la superficie libre hasta el centro de gravedad de la sección analizada

1.1.8. Rápidas hidráulicas

En esta investigación se realizará la modelación numérica de una rápida hidráulica por lo que en el presente tema se definirán algunos conceptos básicos sobre este tipo de estructuras hidráulicas.

1.1.8.1. Definición

La rápida hidráulica es una estructura encargada de conducir el agua desde una elevación mayor a una más baja hacia el cauce del río o canal de salida. Además, presenta una pendiente longitudinal alta, debido a que la diferencia de cotas entre los extremos de la rápida es alta. En consecuencia, se produce un flujo de régimen supercrítico (Pardo & Alegret, 2011).

1.1.8.2. Componentes de una rápida hidráulica

Los elementos de una rápida hidráulica según Villón (2005) son los que se muestran en la Figura 13.

1. **Transición de entrada:** se utiliza para ir modificando gradualmente la sección transversal de un canal, con el fin de unir dos tramos con diferentes formas, secciones transversales, pendiente o dirección.
2. **Sección de control:** es la sección de la estructura donde comienza el cambio a una pendiente elevada, en este punto se dan las condiciones críticas, es decir se produce el tirante crítico.
3. **Canal de la rápida:** sección que conecta el canal de entrada con la trayectoria de la rápida, suele tener una reducción de sección.
4. **Trayectoria:** es la curva vertical parabólica que une el canal de la rápida con el principio de la poza disipadora.
5. **Poza disipadora o colchón amortiguador:** su función es disipar la energía cinética que alcanza el agua al final de la rápida y lo logra a través de un salto hidráulico.
6. **Transición de salida:** une la poza disipadora con el canal de salida aguas abajo.
7. **Zona de protección:** tiene como finalidad proteger el canal de la erosión suele tenerse en cuenta cuando el canal es de tierra.

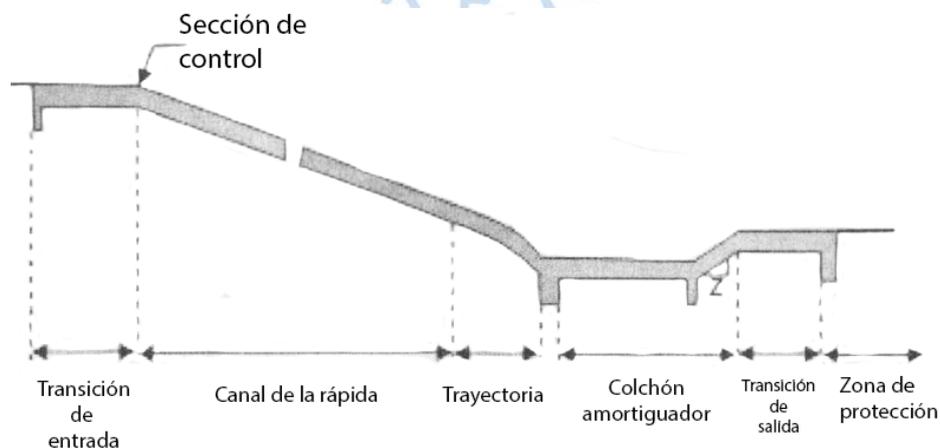


Figura 13. Elementos de una rápida.

Fuente: Villón, 2005.

1.1.8.3. Conceptos de diseño

Los datos de campo necesarios para el diseño hidráulico de una rápida son las propiedades hidráulicas, elevaciones de la rasante, las secciones del canal aguas arriba y aguas abajo de la estructura y un perfil del tramo donde se localizará (Villón, 2005). Se calcula realizando un análisis de flujo en un perfil longitudinal con tramos de fuerte pendiente y calculando las curvas de remanso.

Según Villón (2005) el proceso de diseño de una rápida hidráulica es el siguiente:

1. Diseño del canal aguas arriba y agua debajo de la rápida
2. Cálculo del ancho de solera en la rápida y del tirante en la sección de control
3. Diseño de la transición de entrada
4. Cálculo hidráulico en el canal de la rápida
 - a. Cálculo de tirantes y distancias
 - b. Borde libre
5. Cálculo de la profundidad (elevación) del tanque amortiguador
6. Cálculo de la profundidad del colchón amortiguador
7. Cálculo de la longitud del colchón
8. Cálculo de las coordenadas y elevaciones de la trayectoria parabólica
9. Cálculo de la transición de salida

1.1.9. Cámara de carga

Parte de esta investigación es realizar la modelación numérica de la cámara de carga, que es la estructura previa a la rápida hidráulica, por lo que en el presente aspecto se definirán algunos conceptos básicos sobre ésta.

1.1.9.1. Definición

Es una estructura encargada de conducir el agua desde la obra de toma o bocatoma hasta las tuberías. Previamente almacena una gran cantidad de agua para mantener la presión en las tuberías que alimentan a la turbina, por esta razón es llamada obra de puesta a presión. Gracias a esta estructura, se asegura una mayor eficiencia de generación eléctrica y es necesaria cuando la planta tiene una derivación abierta. (Dolores, 1992).

Aparte de alimentar las tuberías, las cámaras pueden desarrollar otras funciones como captar y almacenar temporalmente los arrastres o sedimentos para su posterior limpieza y eliminar los caudales excedentes que no son turbinados. Para cumplir esta función se necesitan proyectar en la cámara compuertas que permitan la limpieza (Dolores, 1992).

Previamente a la cámara de carga se construye una obra de toma o bocatoma, que es la encargada de conducir el agua del cauce hasta la cámara. Puede tener diversas formas como se muestra en Figura 14

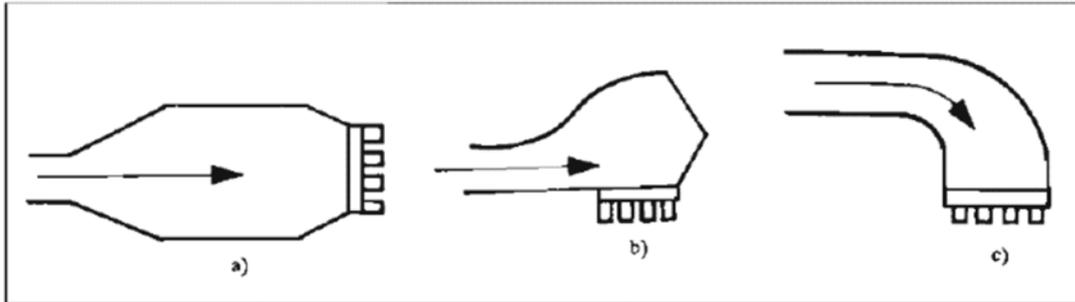


Figura 14. Arreglos de obras de puesta a presión.

Fuente: Dolores, 1992.

1.2. Conceptos teóricos

En este subcapítulo se describirán algunas definiciones y conceptos de variables hidráulicas y de mecánica de fluidos; con el fin de facilitar su comprensión.

- **Densidad absoluta:** se define como la relación de la masa por unidad de volumen de una sustancia (Monge, 2017).

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

Ecuación 1 – 10

Donde:

ρ : densidad

m : masa de la sustancia

V : volumen de la sustancia

- **Presión:** viene a ser la relación entre la fuerza que actúa normal a una superficie y el área de la misma. Para los fluidos, representan una medida de la energía potencial por unidad de volumen en un fluido y la atracción mutua entre sus partículas (Monge, 2017).

$$P = \frac{F}{A}$$

Ecuación 1 – 11

Donde:

F : fuerza actuante

A : área de la superficie en la que actúa la fuerza

- **Presión atmosférica:** este concepto representa la fuerza que ejerce el peso del aire sobre una superficie en la tierra debido a la acción de la gravedad. Disminuye conforme aumenta la altura, a nivel del mar la presión atmosférica es de 1 [atm], 101,325 [kPa] o 760 [mmHg] (Monge, 2017).

- **Presión absoluta:** hace referencia a la presión total a la que está sometido un cuerpo, considera las presiones que actúa sobre él, tanto la atmosférica como la manométrica. Esta presión viene a ser la presión hidrostática, calculada considerando una presión atmosférica de 0 (Monge, 2017).

$$P_{abs} = P_{atm} + P_m$$

$$P_{abs} = P_{atm} + \rho gh$$

Ecuación 1 – 12

Donde:

P_{abs} : presión absoluta

P_{atm} : presión atmosférica

P_m : presión manométrica

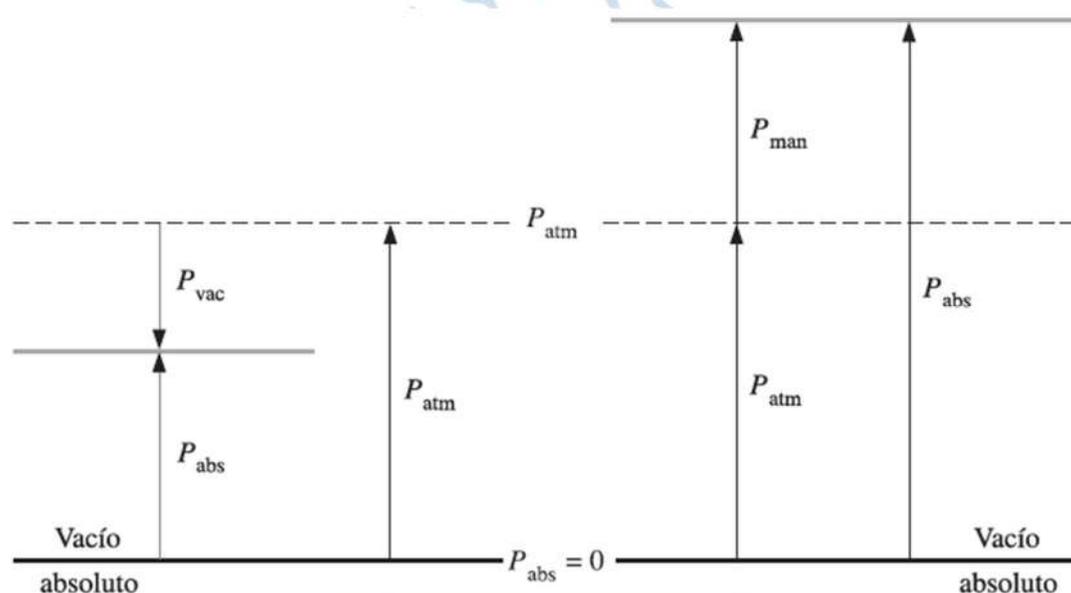


Figura 15. Presión absoluta, manométrica y de vacío.

Fuente: Cengel & Cimbala, 2010.

- **Tensión superficial:** en un líquido es la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área. Se produce solo en interfaces líquido - líquido o líquido – gas y representa la resultante de las fuerzas de cohesión cuando sus moléculas se atraen mutuamente formando una película entre la interfaz del agua y el aire. Cuando el agua se encuentra a 20 °C, se asume una tensión superficial de 0.0728 [N/m] (Monge, 2017).
- **Viscosidad:** esta propiedad se relaciona con la interacción entre las partículas del fluido ofreciendo cierta resistencia al movimiento. Además, si la cohesión es menor, el valor de la viscosidad también es menor. Existe una viscosidad dinámica y una cinemática (Monge, 2017).
- **Líneas de corriente:** son útiles como indicadores de la dirección instantánea del movimiento del fluido en todo el campo del flujo. No se pueden observar visualmente de

manera experimental. Además, se puede identificar la separación de un fluido de una pared sólida y las regiones de recirculación de fluido gracias a estas (Cengel & Cimbala, 2010)

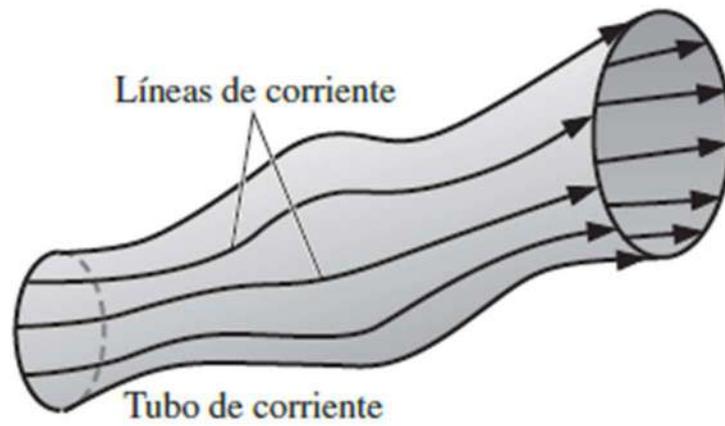
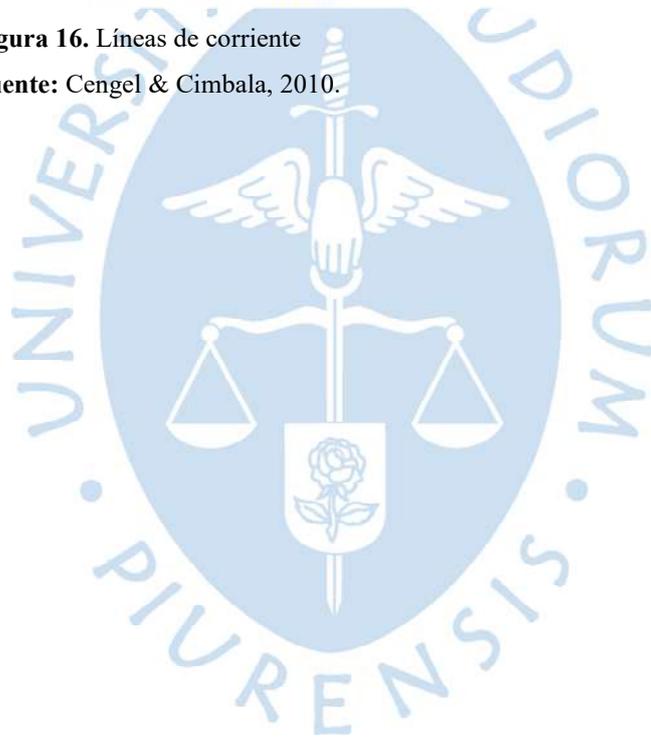


Figura 16. Líneas de corriente

Fuente: Cengel & Cimbala, 2010.



Capítulo 2

Métodos numéricos y dinámica computacional

2.1. Dinámica de fluidos computacional

La dinámica computacional de fluidos o *computational fluid dynamics* (CFD), es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de fluidos y los fenómenos que los gobiernan. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico (Kessler, Dinámica de fluidos computacional: ¿Qué es?, 2016).

Estos flujos y fenómenos se describen mediante ecuaciones diferenciales parciales, las cuales no tienen un resultado analítico, sino que se puede aproximar una respuesta numérica. Para obtener esta solución se debe discretizar el dominio y aproximar las ecuaciones diferenciales a un sistema de ecuaciones algebraicas que se pueden resolver con el uso de un computador (Ferziger & Peric, 2002).

CFD tiene una amplia gama de aplicaciones industriales y no industriales. Algunos ejemplos son (Versteeg, 2007):

- Hidrología y oceanografía: flujos en ríos, estuarios, océanos.
- Entorno externo e interno de los edificios: carga de viento y calefacción / ventilación.
- Ingeniería marina: cargas en estructuras mar adentro.
- Aerodinámica de aviones y vehículos.
- Ingeniería ambiental: distribución de contaminantes y efluentes.

2.1.1. Ventajas y desventajas

Las ventajas que presenta utilizar CFD son (Hirsch, 2007):

- Visualizar todo el sistema y su comportamiento a través de herramientas de visualización por computadora.
- La aplicación de CFD reduce considerablemente el tiempo de diseño en diversas industrias. Al reducir el tiempo reduce también los costos tanto en diseño como en producción, en comparación con los enfoques experimentales.

- CFD ha creado un cambio de paradigma en los procesos de diseño, análisis y soporte. Además, con el aumento de la capacidad computacional y la accesibilidad a mejores computadoras mejorara aún más su uso. CFD se está volviendo más interdisciplinario, ayudando a proporcionar lazos más cercanos entre varias disciplinas; así se logra trabajar en paralelo.
- Se genera un valor agregado para el producto debido al uso de CFD, al lograr soluciones de diseño que de otro modo serían inalcanzables; es decir que no pueden reproducirse en las pruebas experimentales.
- Ofrece la capacidad de resolver una serie de problemas de flujo donde falta el enfoque analítico, teniendo la capacidad de estudiar sistemas en condiciones peligrosas dentro y fuera de sus límites de rendimiento normales.

Las desventajas que presenta utilizar CFD son:

- Mientras más complejo es el fenómeno, se requiere un mayor costo computacional; es decir se necesita computadoras con una mayor potencia (Hirsch, 2007). Tienen un costo aproximado de 10 000 dólares. Además, el costo de mantener un computador de alta gama incluye: un costo mínimo de hardware, costos anuales de mantenimiento y licencia del software (Versteeg, 2007).
- Un usuario CFD necesita aprender cómo analizar correctamente y hacer juicios críticos acerca de los resultados calculados, se debe asegurar que la representación realista del fenómeno estudiado sea cuantitativamente correcta (Hirsch, 2007).
- Pueden presentarse errores numéricos, por lo tanto, habrá diferencias entre los resultados calculados y la realidad; es decir una solución errónea puede verse bien pero no corresponde con el comportamiento del flujo esperado. Los autores han encontrado numerosas características de flujo producidas numéricamente incorrectas que podrían haber sido interpretados como fenómenos físicos aceptables (Versteeg, 2007).

2.1.2. Introducción a los métodos numéricos

Este acápite ha sido redactado tomando como referencia la investigación de Ferziger (2002, cap. 2).

Las ecuaciones de mecánica de fluido solo se pueden resolver para un número limitado de flujos, ayudando a entender su comportamiento. Por esto se ha buscado otros métodos de solución, utilizando simplificaciones de las ecuaciones y casi siempre una entrada empírica. Para esto se necesita realizar un experimento en un modelo a escala. El problema es que muchos

flujos requieren varios parámetros para describirlos y puede ser imposible establecer un experimento que escale correctamente el flujo real. Como la mejora tecnológica requieren una optimización más cuidadosa de los diseños, las nuevas aplicaciones de alta tecnología exigen una detallada predicción de flujos, para lo cual el desarrollo experimental puede ser demasiado costoso y/o lento. Frente a este problema, la solución de las ecuaciones de la mecánica de fluidos en las computadoras se ha vuelto muy importante; este campo se conoce como dinámica de fluidos computacional (CFD).

Se debe tener en cuenta que los resultados numéricos son siempre aproximados. Hay razones para las diferencias entre los resultados calculados y la 'realidad', es decir, surgen errores de cada parte del proceso utilizado para producir soluciones numéricas:

- Las ecuaciones diferenciales pueden contener aproximaciones o idealizaciones: para muchos fenómenos como turbulencia, combustión y flujos multifásicos. Una solución exacta de las ecuaciones no es posible y la solución numérica sin aproximaciones no es factible; esto hace que la introducción de modelos o aproximaciones sea una necesidad.
- Las aproximaciones que se hacen en el proceso de discretización: se pueden reducir utilizando interpolaciones o aproximaciones más precisas o aplicando las aproximaciones a regiones más pequeñas, pero esto generalmente aumenta el tiempo y el costo requerido.
- Al resolver las ecuaciones discretizadas, se utilizan métodos iterativos; estos se deben ejecutar durante mucho tiempo para obtener una solución cercana a la esperada. Los solucionadores directos obtienen soluciones precisas, pero rara vez se usan porque son demasiado costosos. Por esta razón, los métodos iterativos son más comunes, pero existen errores debido a la detención del proceso de iteración demasiado pronto.

2.1.3. Componentes de un método de solución numérica

Este acápite ha sido redactado tomando como referencia la investigación de Ferziger (2002, cap. 2). Se presentará en esta sección algunas definiciones de los componentes que involucra un método de solución numérica.

- **Modelo matemático:** representa el punto de partida de todo método de solución numérica, se refiere el conjunto de ecuaciones diferenciales parciales o integro-diferenciales y condiciones de contorno. Acorde al fenómeno que se requiere simular se escogen sus requerimientos y características como son la viscosidad y compresibilidad. Como se mencionó pueden incluir simplificaciones en las leyes de conservación.
- **Método de discretización:** es un método de aproximación de las ecuaciones diferenciales mediante un sistema de ecuaciones algebraicas en función de las variables. Los más

importantes son: métodos de diferencia finita (FD), volumen finito (FV) y elemento finito (FE). Estos métodos producen la misma solución si se han aplicado correctamente, pero cabe resaltar que algunos métodos son más adecuados que otros, acorde al fenómeno estudiado. Algunos métodos son:

- a. Método de diferencia finita: es el método más fácil de usar en geometrías simples. Se divide al dominio en una cuadrícula determinada y cada punto de la cuadrícula contiene las ecuaciones diferenciales. Estas ecuaciones se aproximan al reemplazar las derivadas parciales por aproximaciones en términos de los valores nodales.
 - b. Método de volúmenes finitos: parte de la división del dominio en un número finito de volúmenes de control contiguos, la forma integral de las ecuaciones de conservación se aplica a cada uno. Para esto, se ubica un nodo computacional en el centroide de cada volumen de control en el que se calcularán las variables. El método puede ser aplicado en cualquier tipo de geometría y requiere tres niveles de aproximación: interpolación, diferenciación e integración.
 - c. Método de elementos finitos: el dominio se divide en un conjunto de elementos finitos (Volúmenes discretos). En 2D suelen ser triángulos y cuadriláteros mientras que en 3D son tetraedros o hexaedros. La solución se aproxima mediante una función de forma lineal dentro de cada elemento finito, así se puede garantizar la continuidad de la solución entre los mismos; luego se sustituye en la integral ponderada de las leyes de la conservación y las ecuaciones se derivan.
- **Malla numérica:** se define mediante una cuadrícula numérica utilizada para dividir el dominio en un número finito de subdominios (elementos, volúmenes de control, etc.), es decir, viene a ser una representación discreta del dominio geométrico. En cada subdominio se calcularán las variables que comprenden las ecuaciones de conservación. El refinamiento de estos elementos puede influir en la precisión de los resultados encontrados, por lo que se necesita realizar modelación con varios tipos de mallados para así asegurar que no sea un factor influyente.
 - **Aproximaciones finitas:** una parte vital de proceso de simulación es elegir las aproximaciones que se utilizarán en el proceso de discretización, estas aproximaciones van acorde al método de discretización utilizado.
 - a. Método de diferencia finita: se requiere aproximaciones para las derivadas en los puntos de la cuadrícula.
 - b. Método de volúmenes finitos: se requiere aproximaciones de integrales de superficie y volumen.

- c. Método de elementos finitos: se debe elegir las funciones de forma (elementos) y las funciones de ponderación.

Estas aproximaciones afectan la precisión del modelo numérico y la dificultad para desarrollar el método de solución. Cabe resaltar que aproximaciones más precisas implican más nodos. Debe existir un equilibrio entre simplicidad, facilidad de implementación, precisión y eficiencia computacional.

- **Método de solución:** después de discretizar, produciéndose una gran cantidad de ecuaciones algebraicas, es necesario elegir el método de solución acorde al problema planteado. Otro factor a considerar es el tipo de cuadrícula y el número de nodos involucrados en cada ecuación algebraica. Como las ecuaciones no son lineales, se utiliza un esquema de iteración para resolverlas.
- **Criterios de convergencia:** se necesita establecer los criterios de convergencia para el método iterativo; existen dos niveles de iteraciones: iteraciones internas, e iteraciones externas. Es importante decidir cuándo detener el proceso iterativo en cada nivel, tanto desde el punto de vista de la precisión como de la eficiencia.

2.1.4. Comportamiento básico de los fluidos

Este acápite ha sido redactado tomando como referencia la investigación de Ferziger (2002, cap. 1).

Los fluidos son sustancias cuya estructura molecular no ofrece resistencia alguna a esfuerzos de corte externos, incluso la fuerza más pequeña provoca la deformación de una partícula de fluido. En la mayoría de casos un fluido puede considerarse como continuo o sustancia continua. El flujo en fluidos es causado por la acción de fuerzas aplicadas externamente, las más comunes incluyen diferencias de presión, gravedad, cizallamiento, rotación y tensión superficial. 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. Si bien el movimiento de los fluidos se produce debido a la acción de estas fuerzas, sus propiedades macroscópicas difieren considerablemente. Propiedades como la densidad y viscosidad deben conocerse para entender el comportamiento del fluido.

La velocidad es un factor importante que afecta las propiedades del flujo. Cuando las velocidades son lo suficientemente bajas al tener un flujo lento, la inercia del fluido es despreciable por lo tanto puede ignorarse. Cuando esto sucede, cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave produciéndose un flujo laminar y a medida que aumenta la velocidad, la inercia se vuelve importante, esto produce inestabilidad que eventualmente originaría un tipo

de flujo más aleatorio llamado turbulento. La transición laminar-turbulenta es otra área importante en el comportamiento de los fluidos.

Existen otros fenómenos que afectan el flujo de fluidos, tales como diferencias de temperatura que conducen a la transferencia de calor, diferencias de densidad que dan lugar a la flotabilidad, la variación de otras propiedades como la viscosidad, la tensión superficial, etc. Estos también pueden ser factores importantes en el estudio del flujo.

2.1.5. Mecánica de fluidos y principios de conservación

El siguiente acápite ha sido redactado tomando como referencia las investigaciones de Hirsch (2007, part. 1) y Ferziger (2002, cap. 1).

La dinámica de fluidos comienza a existir tan pronto como la interacción entre un número suficientemente alto de partículas afecta y domina, al menos en parte, el movimiento de cada partícula individual. Por lo tanto, la dinámica de fluidos es esencialmente el estudio del movimiento interactivo y el comportamiento de una gran cantidad de elementos individuales. Se considerará el sistema de elementos que interactúan como un continuo. Esto expresa que existe continuidad o cercanía entre los elementos de modo que su interacción mutua domina sobre los movimientos individuales. Es decir, el movimiento colectivo se superpone al movimiento de los elementos aislados como consecuencia de la gran cantidad de estos elementos que coexisten dentro del mismo dominio.

2.1.5.1. Ley de la conservación

La ley de la conservación es el concepto fundamental detrás de las leyes de la mecánica de fluidos. Conservación significa que la variación de una cantidad de flujo dentro de un volumen dado (Volumen de control) resulta ser el valor neto de algunas fuentes internas y la cantidad de flujo que cruza el límite del volumen. Por ejemplo, para una cantidad U se debe cumplir su variación dentro de un dominio dado es igual al saldo entre la cantidad entrando y la cantidad saliendo del dominio considerado, más las contribuciones de fuentes eventuales que se presenten. Es decir, es la tasa de cambio de la cantidad U durante la evolución del flujo.

Las leyes que describen la evolución de los flujos de fluidos, están totalmente definidas por la conservación de las siguientes tres cantidades, dado que representan declaraciones matemáticas de las leyes de conservación de la física:

- a. Masa
- b. Momentum. La tasa de cambio de momento es igual a la suma de las fuerzas en una partícula del fluido (Segunda Ley de Newton).

- c. Energía. La tasa de cambio de energía es igual a la suma de la tasa de calor. Además, la tasa de trabajo realizado en una partícula de fluido (Primera Ley de la Termodinámica)
- Por otro lado, es esencial tener en cuenta que otras cantidades, como la presión, la temperatura, la entropía, por ejemplo, no satisfacen una ley de conservación.

Las leyes o principios de conservación se aplican para propiedades extensivas, dado que describe el comportamiento del fluido en términos de propiedades macroscópicas. En los flujos de fluidos se considera tratar el flujo dentro de una determinada región espacial que llamamos volumen de control (CV. La ley de conservación relaciona la tasa de cambio de la cantidad de esa propiedad en una masa de control dada. Debido a que la masa no se crea ni se destruye en los flujos de interés de ingeniería, la ecuación de conservación se puede escribir:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 1 - 13}$$

Por otro lado, el momento se puede cambiar por la acción de las fuerzas y su ecuación de conservación sería la Ecuación 1 - 14:

$$\frac{\partial(mv)}{\partial t} = \sum f \quad \text{Ecuación 1 - 14}$$

Donde es:

t: tiempo

v: velocidad

f: fuerzas actuantes en el control de masa

Para que las propiedades extensivas se conviertan en intensivas, éstas deben expresarse de manera independiente a la cantidad de materia considerada; para lograr esto se modifican las leyes de conservación y se expresan en forma de volumen de control. Si definimos ϕ como cualquier propiedad intensiva conservadora; para que se cumple la conservación de la masa $\phi = 1$; para la conservación de momentum $\phi = v$ y para la conservación de un escalar, ϕ representa la propiedad conservativa por unidad de masa. Su propiedad extensiva puede ser:

$$\phi = \int_{\Omega_{cm}} \rho \phi \, d\Omega \quad \text{Ecuación 1 - 15}$$

El término Ω_{cm} representa el volumen de control de la masa estudiada, la parte izquierda de toda ecuación de conservación para un volumen de control puede ser expresada como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi \, d\Omega = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_{cv}} \rho \phi \, d\Omega + \int_{S_{cv}} \rho \phi (v - v_b) \cdot n \, dS \quad \text{Ecuación 1 - 16}$$

Donde es:

Ω_{cv} : volumen del volumen de control

s_{cv} : superficie que encierra el volumen de control

n : vector unitario ortogonal a s_{cv} y direccionado hacia afuera

v : velocidad del fluido

v_b : velocidad del volumen de control

La ecuación 1 - 16 establece que la tasa de cambio de la cantidad de propiedad en el control de masa (ϕ) sea equivalente a la tasa de cambio de la propiedad dentro del control de volumen, más el flujo neto de ésta a través de la frontera del CV debido al movimiento relativo del fluido sobre el mismo.

2.1.5.2. Ley de la conservación de la masa

La ley de conservación es una declaración general de naturaleza cinemática. Independiente de la naturaleza del fluido o de las fuerzas que actúan sobre él; expresa el hecho que la masa no puede desaparecer del sistema fluido ni crearse. Considera un volumen de control V fijo en el espacio y tiempo. El fluido se mueve a través del volumen de control fijo.

La conservación de la masa requiere que la tasa de cambio de la masa que entra al volumen de control sea equivalente a flujo de la masa que atraviesa dicho volumen. La forma integral de la ecuación de conservación de masa (continuidad) se deduce directamente de la ecuación 1 - 16, estableciendo $\phi = 1$:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho v \cdot n dS = 0 \quad \text{Ecuación 1 - 17}$$

Al aplicar el teorema de divergencia de Gauss al término de convección, podemos transformar la integral de superficie en una integral de volumen. Permitir que el volumen de control se vuelva infinitesimalmente pequeño conduce a una forma diferencial libre de coordenadas de la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 \quad \text{Ecuación 1 - 18}$$

Esta forma se puede transformar en una forma específica para un sistema de coordenadas dado al proporcionar la expresión para el operador de divergencia en ese sistema. Consideramos un elemento de fluido tan pequeño con lados δ_x , δ_y y δ_z como lo muestra la Figura 17.

Las seis caras están etiquetadas con N, S, E, W, T y B, que significa Norte, Sur, Este, Oeste, Superior e Inferior (Figura 17). También se dan las direcciones positivas a lo largo de los ejes de coordenadas y el centro del elemento está ubicado en la posición (x, y, z) . Todas las propiedades del fluido son funciones del espacio y el tiempo, por lo que sería estrictamente

necesario escribir $\rho(x, y, z, t)$, $p(x, y, z, t)$, $T(x, y, z, t)$ y $u(x, y, z, t)$ para la densidad, presión, temperatura y el vector de velocidad respectivamente. Sin embargo, simplificaremos la denotación por ejemplo la densidad en el centro (x, y, z) de un elemento fluido en el tiempo t en la dirección x , se denota por $\partial\rho / \partial x$.

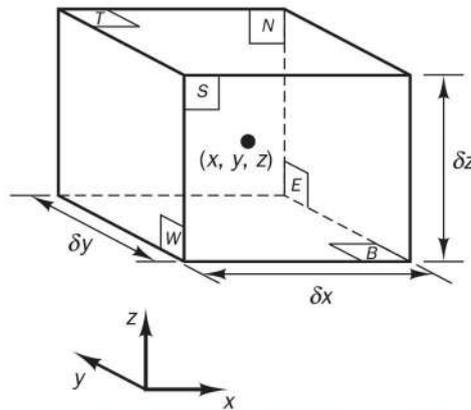


Figura 17. Elemento de un fluido.

Fuente: Versteeg, 2007.

Presentamos a continuación la forma cartesiana tanto en tensor como en notación expandida. Aquí y a lo largo de este libro adoptaremos la convención de Einstein de que siempre que el mismo índice aparezca dos veces en cualquier término, la suma sobre el rango de ese índice está implícita.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad \text{Ecuación 1 - 19}$$

Donde x_i ($i = 1,2,3$) o (x, y, z) son las coordenadas cartesianas y u_i o (u_x, u_y, u_z) son los componentes cartesianos del vector de velocidad v . La ecuación 1 - 19 es la conservación de la masa o ecuación de la continuidad en un punto para un fluido compresible.

2.1.5.3. Ley de la conservación de la Momentum

Los fenómenos de transporte de momentum son de primordial interés en mecánica de fluidos ya que ellos engloban los mecanismos de resistencia, esfuerzos de corte internos y de frontera, propulsión y fuerzas en cuerpos sumergidos. La segunda ley de Newton establece que la tasa de cambio de momento de una partícula fluida es igual a la suma de las fuerzas sobre la partícula. Por lo tanto, la ecuación de conservación de Momentum está basada en la ecuación de volumen de control descrita anteriormente considerando un volumen fijo en el espacio que contiene un fluido, se reemplazará el valor de ϕ por v obteniendo:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho v \, d\Omega + \int_S \rho v v \cdot n \, dS = \sum f \quad \text{Ecuación 1 - 20}$$

En el primer término se detalla la tasa de aumento del momentum de la partícula fluida y en el segundo la suma de fuerzas en la partícula del fluido. Se distinguen fuerzas de superficie como presión, viscosidad y gravedad que actúan directamente en la superficie del elemento; y fuerzas en el cuerpo como centrífuga, Coriolis y fuerzas electromagnéticas.

Las fuerzas superficiales como la presión y las tensiones son, desde el punto de vista molecular, los momentos microscópicos que fluyen a través de la superficie. Si estos flujos no pueden escribirse en términos de las propiedades cuya conservación gobierna las ecuaciones, el sistema de ecuaciones no está cerrado por lo que la solución no es posible. Esta posibilidad se puede evitar haciendo ciertas suposiciones. La suposición más simple es que el fluido es newtoniano; afortunadamente, el modelo newtoniano se aplica a muchos fluidos reales.

Con las fuerzas del cuerpo (por unidad de masa) representadas por b , la forma integral de la ecuación de conservación del momento (Ecuación 1 - 20) se convierte en:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho v d\Omega + \int_S \rho v v \cdot n dS = \int_S T \cdot n dS + \int_{\Omega} \rho b d\Omega \quad \text{Ecuación 1 - 21}$$

Una forma vectorial libre de coordenadas de la ecuación de conservación de momento (Ecuación 1 - 21) se obtiene fácilmente aplicando el teorema de divergencia de Gauss a los términos convectivo y difusivo del flujo:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v v) = \text{div}(T) + \rho b \quad \text{Ecuación 1 - 22}$$

Finalmente, para la parte viscosa del tensor de estrés, utilizando coordenadas cartesianas, y si la gravedad es la única fuerza del cuerpo, se tiene:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial r_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad \text{Ecuación 1 - 23}$$

Donde es:

g : componente de aceleración de la gravedad

r_{ij} : vector posición

p : presión estática

2.1.5.4. Ecuación de Navier Stokes

Los fluidos son sustancias con poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene y un fluido newtoniano es aquel cuya viscosidad se considera constante en el tiempo. En esta sección presentaremos las ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos, conocida como el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes, que expresan la conservación de las tres cantidades fundamentales: masa, momento y energía. Este sistema

de ecuaciones de Navier-Stokes es válido para cualquier flujo laminar o turbulento de cualquier fluido y cualquier fenómeno que presente fluidos del tipo newtoniano.

Sabemos que la descripción más general de un flujo de fluido es el sistema completo de ecuaciones de Navier-Stokes, dado que las leyes de conservación para las tres cantidades básicas de flujo se pueden escribir en una forma compacta. Dichas ecuaciones surgen al aplicar los principios de conservación de la mecánica y termodinámica a los fluidos, obteniéndose la conocida formulación integral de las ecuaciones.

Estas ecuaciones se obtienen considerando varios factores, entre ellos, la linealidad entre los esfuerzos tangenciales y el gradiente de velocidad (Ley de viscosidad de Newton) y la conservación de masa junto con la incompresibilidad. La combinación de estos principios da como resultado la siguiente ecuación, esta formulación es la forma más famosa para el desarrollo por el método de volúmenes finitos:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2\mu \left(D_{ij} - \frac{\Delta \delta_{ij}}{3} \right) \right] \quad \text{Ecuación 1 - 24}$$

Donde:

ρ : densidad

u_i : para ($i = 1, 2, 3$) son las componentes cartesianas de la velocidad

F_i : fuerzas externas aplicadas sobre el cuerpo

P : presión del fluido

μ : viscosidad dinámica

Δ : representa la divergencia del fluido

δ_{ij} : delta de Kronecker

Esta expresión, al aplicarse para cada uno de los componentes cartesianos, genera un sistema de ecuaciones cuya característica de no linealidad supone la aparición de derivadas de segundo orden, dando como resultado que las ecuaciones de Navier-Stokes (Coordenadas cartesianas):

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad \text{Ecuación 1 - 25}$$

Ecuación de momentum

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] + \rho f_{m_x} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 1 - 26}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] + \rho f_{m_y}$$

Ecuación 1 – 27

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho f_{m_z}$$

Ecuación 1 – 28

Al ser un conjunto de ecuaciones no lineales, no existe una única solución general para este conjunto de ecuaciones; solamente bajo ciertas condiciones o situaciones muy concretas se puede hallar una solución analítica. En muchas ocasiones es necesario recurrir a métodos numéricos para determinar una solución aproximada.

2.1.6. Modelos matemáticos simplificados

Este acápite ha sido redactado tomando como referencia las investigaciones de Ferziger (2002, cap.1).

Las ecuaciones de conservación para masa y momentum son no lineales, acoplados y difíciles de resolver. Por esto, resulta difícil demostrar con las herramientas matemáticas, que existe una solución única para unas condiciones de frontera particulares. Muchos estudios demuestran que las ecuaciones de Navier-Stokes describen el flujo de un fluido newtoniano con precisión. Solo en un pequeño número de casos, principalmente flujos totalmente desarrollados en geometrías simples, es posible obtener una solución analítica de las ecuaciones de Navier-Stokes. En la mayoría de los casos, incluso las ecuaciones simplificadas no pueden resolverse analíticamente y se tiene que usar métodos numéricos. Enumeramos a continuación algunos tipos de flujo para los cuales se pueden simplificar las ecuaciones de movimiento.

2.1.6.1. Fluidos incompresibles

Las ecuaciones de conservación para masa y momento presentadas anteriormente son generales. Además, realizan algunas suposiciones como: todas las propiedades de fluidos y flujos varían en espacio y tiempo, y la densidad del fluido es constante. Esto último es cierto en la mayoría de los flujos de líquidos, y tales flujos son incompresibles. En ese caso, las ecuaciones de conservación de masa y momentum se reducen a:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \text{div}(u_i v) = \text{div}(v \text{ grad } u_i) - \frac{1}{\rho} \text{div}(p i_i) + b_i$$

Ecuación 1 – 29

Donde $\nu = \mu / \rho$ es la viscosidad cinemática. En general, esta simplificación ayuda en la solución numérica en los casos de flujos incompresibles.

2.1.6.2. Aproximación de capa límite

Cuando el flujo tiene una sola dirección (no presenta flujo inverso o recirculación) y la variación de la geometría es gradual, se podría considerar que el comportamiento del flujo está influenciado por lo que sucedió aguas arriba. Por ejemplo, flujos en canales y tuberías y flujos sobre paredes planas o sólidas ligeramente curvadas. Dichos flujos se denominan flujos de capa de corte delgada o capa límite. Las ecuaciones de Navier-Stokes se pueden simplificar para tales flujos considerando las siguientes suposiciones:

- El componente de velocidad en la dirección del flujo principal es mucho más grande que los componentes en otras direcciones.
- El gradiente de presión a través del flujo es mucho más pequeño que en la dirección del flujo principal.
- El transporte difuso del momento en la dirección del flujo principal es mucho más pequeño que la convección.

Las ecuaciones de la capa límite bidimensional se reducen a:

$$\frac{\partial(\rho u_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_1 u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_2 u_1)}{\partial x_2} = \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} - \frac{\partial p}{\partial x_1} \quad \text{Ecuación 1 – 30}$$

La presión en función de x_1 debe suministrarse mediante un cálculo del flujo exterior a la capa límite, que generalmente se supone que es flujo potencial, por lo que las ecuaciones de la capa límite en sí mismas no son una descripción completa del flujo. Las ecuaciones simplificadas se pueden resolver mediante el uso de técnicas de marcha similares a las utilizadas para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias con condiciones iniciales.

2.1.6.3. Modelado de fenómenos de flujo complejo

Muchos flujos de interés práctico tienen una matemática difícil de describir de forma precisa y mucho menos resolver exactamente. Estos flujos incluyen turbulencia, combustión, flujo multifásico y son muy importantes. Dado que la descripción exacta a menudo es impracticable, generalmente se utilizan modelos semiempíricos para representar estos fenómenos.

Los modelos son de turbulencia, los modelos de combustión, los modelos multifásicos, etc. Estos modelos, así como las simplificaciones mencionadas anteriormente, afectan la precisión de la solución. Los errores introducidos por las diversas aproximaciones pueden

aumentar o cancelarse entre sí, por lo tanto, se necesita cuidado al sacar conclusiones de los cálculos en los que se utilizan los modelos.

2.1.7. Modelos de turbulencia

Este acápite tocará las diferentes aproximaciones que se pueden definir para reducir la complejidad del sistema de ecuaciones de flujo; basándose en consideraciones físicas, relacionadas con las propiedades dinámicas de los flujos de fluidos y al fenómeno de turbulencia presentes en el mismo.

2.1.7.1. Turbulencia

La turbulencia es un fenómeno que se da en forma caótica en el cual las partículas se mueven desordenadamente. Prácticamente todos los flujos de interés en la ingeniería son turbulentos; los cuales surgen debido a números de Reynolds muy grandes. Por lo tanto, un flujo en el cual predominan los esfuerzos inerciales sobre los esfuerzos viscosos es considerado turbulento (Jaramillo Mejía, 2017).

Como se detalló en el acápite 1.1.3, los flujos pueden clasificarse como laminares, en transición y turbulentos (Figura 18); acorde al número de Reynolds que presentan. Variaciones significativas en el nivel de turbulencia pueden significar pérdida de carga, intercambio de calor, difusión etc (Kessler, Flujo turbulento, 2016).

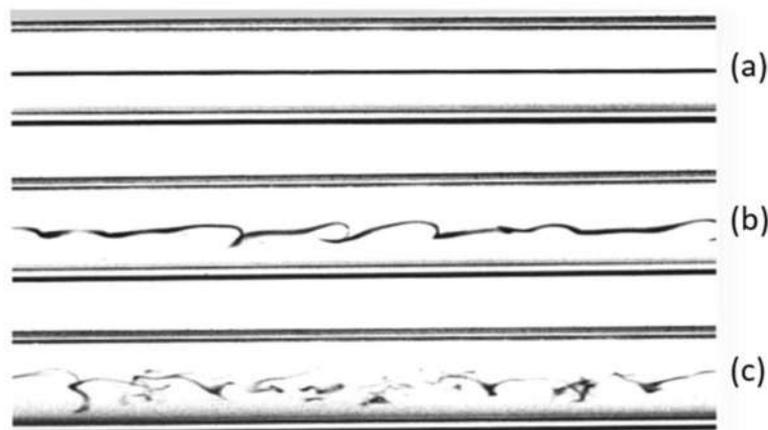


Figura 18. Regímenes de flujo. a) Laminar, b) Transición y c) Turbulento.

Fuente: Kessler, Flujo turbulento, 2016.

2.1.7.2. Características

La mayoría de los flujos estudiados por la ingeniería son turbulentos y, por lo tanto, requieren un tratamiento diferente. Este tipo de flujos presentan las siguientes características (Kessler, Flujo turbulento, 2016):

- Son muy inestables, es decir, su velocidad en función del tiempo presenta un comportamiento aleatorio. Por lo tanto, es un fenómeno transiente.
- Su estudio se realiza en tres dimensiones y presentan una gran cantidad de vorticidad.
- La turbulencia aumenta la velocidad a la que se agitan las cantidades conservadas.
- Los últimos estudios sobre flujos turbulentos han demostrado que poseen estructuras coherentes, eventos repetibles y deterministas; sin embargo, el componente aleatorio de los flujos turbulentos (intensidad e intervalo de tiempo) hace que se dificulte su estudio.
- Los flujos turbulentos fluctúan en una amplia gama de escalas de longitud y tiempo, por lo que se hace difícil resolver una simulación numérica directa de los mismos.
- Multiplicidad de escalas: la turbulencia se caracteriza por la presencia de varias escalas, desde las más grandes – que son proporcionales a la geometría – hasta las más pequeñas – que son inversamente proporcionales al número de Reynolds. Se traslada la energía cinética desde las escalas más grandes hasta las más pequeñas.
- Disipación: la turbulencia es altamente disipativa. Si se quita la fuente de energía, la turbulencia deja de existir, rápidamente.
- Difusión: la turbulencia causa aumento en la difusión del fluido, es decir, hay un aumento en la tasa de mezcla.

2.1.7.3. Turbulencia en CFD

Este acápite ha sido redactado tomando como referencia las investigaciones de Ferziger (2002, cap. 9).

La turbulencia puede ser deseable o no deseable, dependiendo de la aplicación que se estudia. Para esto, los ingenieros deben comprender los efectos que conlleva y así poder predecir el comportamiento del fluido. En el pasado se estudiaba los flujos turbulentos de manera experimental, sin embargo, con el avance de la tecnología y la sofisticación de los dispositivos de ingeniería, se requiere niveles de detalle y precisión más altos. Esta situación dificulta realizar un enfoque experimental, al ser demasiado costoso y por el nivel de precisión realizar mediciones suele ser difícil. Como resultado, los métodos numéricos representan una solución.

Existen diferentes enfoques para predecir flujos turbulentos, acorde con Bardina et al. (1980) hay seis categorías, las cuales detallaremos a continuación:

1. El primero implica el uso de correlaciones, es muy útil, pero se limita a tipos simples de flujos, que pueden caracterizarse por unos pocos parámetros.

2. El segundo usa ecuaciones integrales que pueden derivarse de las ecuaciones de movimiento integrando sobre una o más coordenadas. Por lo general, esto reduce el problema a una o más ecuaciones diferenciales ordinarias que se resuelven fácilmente.
3. El tercero conduce un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales llamadas ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) promediadas por Reynolds. El método se basa en ecuaciones obtenidas promediando las ecuaciones de movimiento a lo largo del tiempo (si el flujo es estadísticamente estable), sobre una coordenada en la que el flujo medio no varía, o sobre un conjunto de realizaciones (un conjunto imaginario de flujos en el que todos los factores controlables se mantienen fijos). Estas ecuaciones no forman un conjunto cerrado, por lo que este método requiere la introducción de aproximaciones (modelos de turbulencia).
4. El cuarto se llama cierre de dos puntos. Este método utiliza ecuaciones para la correlación de los componentes de velocidad en dos puntos espaciales. Es usado solo cuando se considera que el fenómeno estudiado presenta turbulencia homogénea.
5. El quinto es la simulación de Eddy (LES) y resuelve los movimientos de mayor escala del flujo mientras se aproxima o modela solo los movimientos de pequeña escala. Es una combinación entre la simulación numérica directa, la cual se verá a continuación y el método de cierre de un punto.
6. La sexta es una simulación numérica directa (DNS) en la que las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven para todos los movimientos en un flujo turbulento.

Los métodos enumerados requieren que se resuelvan las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía; presentándose una mayor dificultad para flujos turbulentos en comparación con laminares debido a que los turbulentos contienen variaciones en un rango mucho más amplio de escalas de longitud y tiempo. Es decir, las ecuaciones que describen los flujos turbulentos suelen ser mucho más difíciles y costosas de resolver.

2.2. ANSYS CFX

ANSYS CFX es un software de dinámica de fluidos computacional (CFD), que combina un solucionador avanzado con potentes capacidades de preprocesamiento y posprocesamiento. Su uso es práctico dado que posee un interfaz de modelación tridimensional atractiva para el usuario. Este paquete computacional integra un solucionador acoplado avanzado que es confiable y robusto, una definición completa del problema, análisis y presentación de resultados y un proceso de configuración intuitivo e interactivo (ANSYS. INC, CFX Introduction, 2016).

ANSYS CFX es capaz de modelar flujos transitorios y de estado estacionario, flujos laminados y turbulentos, flujos subsónicos, transónicos y supersónicos, transferencia de calor

y radiación térmica, flotabilidad, flujos no newtonianos, flujos multifásicos, combustión, flujos en múltiples marcos de referencia y seguimiento de partículas (ANSYS. INC, CFX Introduction, 2016).

2.2.1. Estructura de modelación

Para realizar el análisis del flujo de un fluido en ANSYS CFX se sigue los pasos que se muestran en la Figura 19, en los cuales se utiliza los cuatro módulos de software que forman parte del paquete computacional.

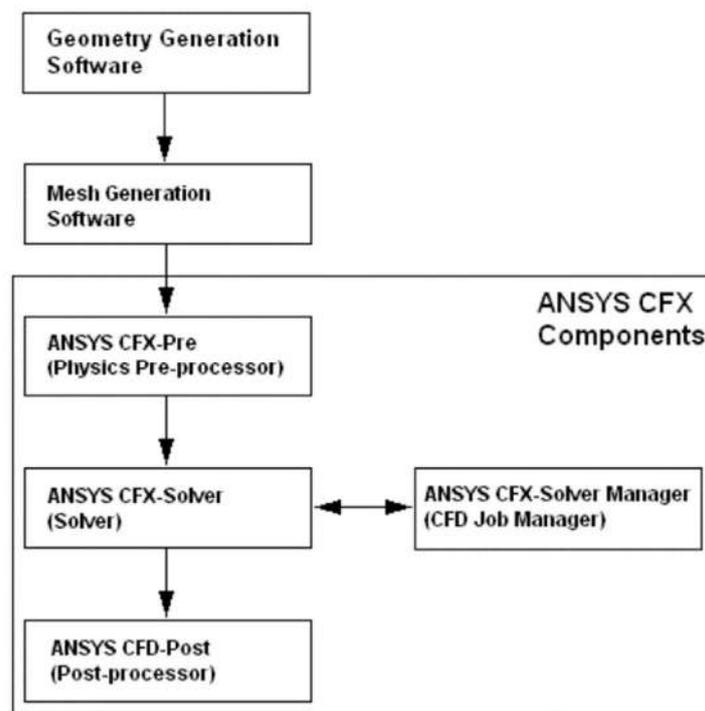


Figura 19. Flujo de datos ANSYS CFX.

Fuente: ANSYS. INC, CFX Introduction, 2016.

A continuación, se definirán los pasos que se deben seguir para realizar una modelación en el paquete computacional ANSYS CFX (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016):

- a) **Definir los objetivos de la modelación:** El primer paso al realizar una modelación consiste en encontrar los resultados que queremos obtener, las simplificaciones que podemos aplicar al análisis (simetría, periodicidad, etc.), el grado de exactitud que requiere nuestro análisis, la rapidez que necesitamos para la obtención de resultados y finalmente debemos preguntarnos si ANSYS CFX es la herramienta apropiada.
- b) **Identificar el dominio del modelo:** Se busca identificar el dominio que se necesita aislar del sistema para su posterior análisis. Debemos preguntarnos si tenemos la información necesaria para definir las condiciones de frontera del problema (Figura 20).

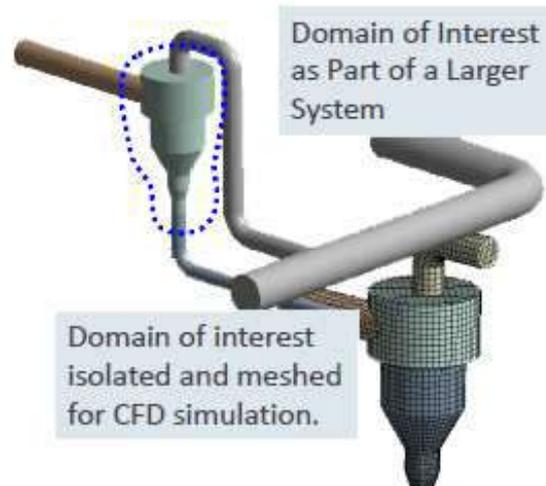


Figura 20. Dominio de interés.

Fuente: ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016.

- c) **Crear un modelo sólido:** ANSYS cuenta con dos complementos para la creación de geometría el *Design Modeler* y *Space Claim*. Los pasos básicos que implica esta etapa son: definir la geometría de la región de interés y crear regiones de flujo de fluidos, regiones sólidas y asignar nombres a las superficies de condiciones de frontera. Se debe evaluar también la eliminación de características innecesarias que puedan complicar la solución. Además, se puede importar la geometría desde los principales softwares CAD.
- d) **Diseñar y crear la malla:** Esta etapa de pre procesamiento está altamente automatizada, teniendo como objetivo obtener una malla; esta será importada en el CFX PRE o pre procesador de la física. ANSYS cuenta con un complemento en que se debe especificar las propiedades de la malla, para luego generarla.
- e) **Definición de la física del modelo:** Comienza al importar la malla al CFX PRE, complemento en el que se define ciertos parámetros de la simulación. Luego se definen elementos de la modelación como:
- Las propiedades de los materiales tanto de sólidos, líquidos y gases.
 - Los modelos físicos: turbulencia, flotabilidad, multifase, etc.
 - Las condiciones de frontera (velocidad, flujo másico, presión, simetría, periodicidad, etc.) que serán utilizadas en el modelo.
 - Proveer valores iniciales para la primera iteración.
 - Los valores para la convergencia de la simulación.
 - Aproximaciones de la turbulencia.

Además, se seleccionan los modelos físicos que se incluirán. Esta etapa se considera iterativa, es decir, si no se obtienen los resultados deseados se debe proceder a cambiar las configuraciones colocadas en el CFX PRE; para luego ejecutar el CFX SOLVER.

f) Calcular la solución: Esta etapa se realiza en el CFX SOLVER, el cual se ejecuta para producir un archivo de resultados, conteniendo los valores que corresponden a velocidad, presión u otra variable en la región de interés. El cálculo de las variables se realiza mediante un proceso iterativo. Comprende los siguientes pasos:

1. Las ecuaciones diferenciales parciales se integran en todos los volúmenes de control en la región de interés. Esto es equivalente a aplicar una ley de conservación básica (por ejemplo, para masa o momento) a cada volumen de control.
2. Estas ecuaciones integrales se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas generando un conjunto de aproximaciones para los términos en las ecuaciones integrales.
3. Las ecuaciones algebraicas se resuelven iterativamente.

Al ser las ecuaciones de naturaleza no lineal, se buscará una solución que se acerque a la exacta, cuando esto sucede se dice que la modelación converge. En el CFX PRE se configura la medida de conservación general de las propiedades o también llamado residual. La cercanía respecto a la solución exacta depende del valor residual configurado, el tamaño de los volúmenes de control y las simplificaciones de fenómenos físicos como la turbulencia.

Además, se cuenta con el CFX SOLVER MANAGER, el cual ayuda a tener control sobre la gestión del proceso de cálculo del CFX SOLVER, entre sus principales beneficios se encuentran: iniciar y detener el solucionador, monitorear el progreso de la solución, configurar el solucionador para ejecutar un cálculo paralelo. El complemento CFX SOLVER produce un archivo de resultados que luego se importa al post procesador.

g) Visualización y análisis de los resultados en el pos procesador: Los resultados se pueden visualizar, analizar y presentarse de forma interactiva; proporcionando al ingeniero una comprensión del comportamiento de fluido en toda la región de interés. El CFX POST es el complemento del paquete computacional que nos sirve para realizar estas funciones, entre sus principales beneficios se encuentra:

- Visualización de la geometría y los volúmenes de control.
- Gráficos vectoriales que muestran la dirección y la magnitud del flujo.
- Visualización de la variación de variables escalares a través del dominio.
- Cálculos numéricos cuantitativos.
- Animación.
- Gráficos que muestran el cambio de las variables físicas en el dominio.

2.2.2. Geometría

Es importante definir la geometría, a partir de esta se obtendrá la región del fluido. Esta geometría puede obtenerse de un modelo realizado en algún software CAD para luego importarlo al módulo de geometría de ANSYS (*Computer aided design*). Es esencial simplificar la geometría dado para facilitar el cálculo de las variables por el CFX SOLVER, se debe remover las partes complejas que no tiene influencia sobre el flujo del fluido. Esta práctica facilita también la tarea de mallado.

Se puede obtener la geometría de cualquier software CAD como SolidWorks, Autodesk Inventor, Solid Edge, entre otros; dado que el módulo para realizar la geometría o Design Modeler (DM) cuenta con una gran variedad de formatos de importación.

2.2.3. Mallado

Una malla es la representación discretizada del dominio y debe ser capaz de capturar gradientes de interés, como, por ejemplo: velocidad, presión, temperatura, etc. Es importante elegir un mallado apropiado acorde a la geometría del dominio, según esta se elegirá también el tipo de elemento utilizado para realizar el mallado, los elementos que maneja el complemento para mallado de ANSYS se muestran en la Figura 21 (Jaramillo Mejía, 2017).

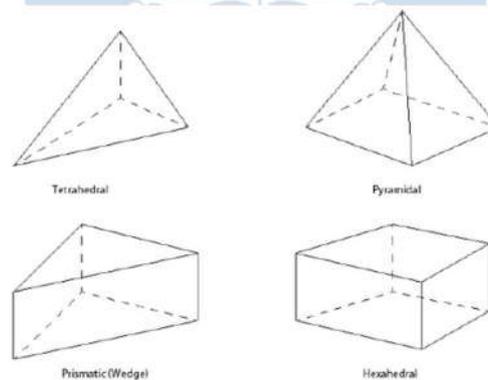


Figura 21. Tipos de elementos en una malla.

Fuente: ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016.

Durante el proceso de mallado se deben tomar en cuenta factores como: la complejidad de la geometría del dominio, la precisión requerida y la capacidad de los recursos informáticos (hardware) dado que al realizar una discretización con elementos de menor tamaño aumentará notablemente el número de elementos, este factor está ligado también a la disponibilidad de tiempo para realizar la modelación (Jaramillo Mejía, 2017).

La configuración del mallado es una de las etapas de mayor relevancia a lo largo de la modelación. Una malla elegida incorrectamente puede influir en gran medida sobre los resultados obtenidos. Como se muestra en la Figura 22 durante el proceso de modelación se

realiza también un remallado o *remeshing*, con la finalidad de obtener mejores resultados en el siguiente cálculo de la modelación. Esta actividad está presente en el flujo de trabajo de la simulación general e incluye tres pasos adicionales (ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016):

- **Extracción de datos:** se obtienen los datos necesarios de los resultados del análisis más reciente y los valores de puntos de monitoreo, para guiar las modificaciones de geometría y el remallado.
- **Modificación de geometría:** se procede a actualizar la geometría para que se ajuste a los resultados de análisis y/o de ensayos o mediciones realizadas.
- **Recreación de malla:** se configura al mallado con la finalidad de obtener una discretización del dominio más adecuada para obtener los resultados deseados.

Después de realizar los pasos detallados se procede a insertar las nuevas mallas en la definición de análisis y ejecutar la solución de la modelación, para poder pasar al análisis de resultados en la etapa de post procesamiento. Si los resultados obtenidos no son confiables se vuelve a evaluar la geometría y el mallado (ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016).

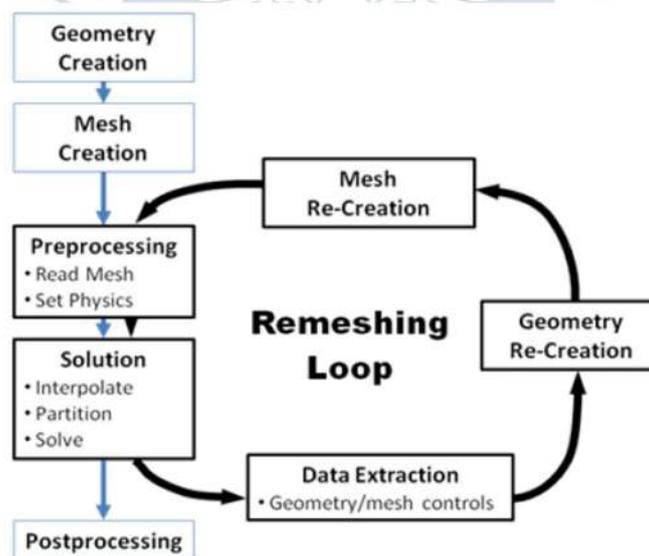


Figura 22. Remallado en el flujo de trabajo.

Fuente: ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016.

El módulo para realizar el mallado en ANSYS posee las herramientas suficientes para crear mallas de alta calidad, además se puede importar archivos de mallas externas. A continuación, se describirá los tipos de mallado que se pueden realizar en el software.

2.2.3.1. Tipos de mallado

La precisión de los resultados depende también del tipo de malla que se utiliza. Existen los siguientes tipos (Monge, 2017):

- **Malla no estructurada:** comprende las mallas donde se discretiza el dominio en volúmenes finitos usando elementos del tipo tetraédrico (Figura 23). Resultan útiles en cuerpos que presentan una geometría compleja dado que fácilmente se adaptan a la geometría. Sin embargo, al presentar una forma irregular la calidad de los resultados será menor y el cálculo tomará más tiempo, esto se debe a la necesidad de utilizar algoritmos más complejos (Jaramillo Mejía, 2017).

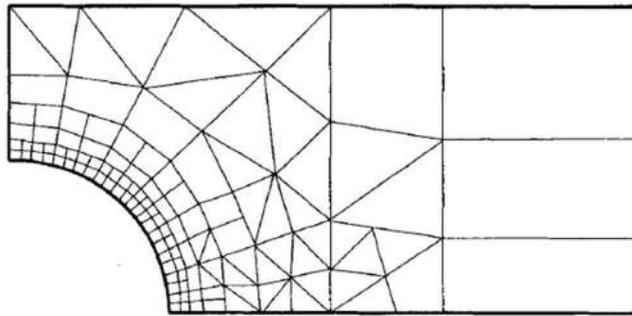


Figura 23. Malla no estructurada.

Fuente: Ferziger, 2002.

- **Malla estructurada:** este tipo de mado discretiza el dominio con elementos hexaédricos, formando bloques organizados como se muestra en la Figura 24. Es el tipo de malla más simple, por esta razón, presenta un menor tiempo de cálculo y mejores resultados debido a que las líneas de corriente del flujo siguen el orden de los elementos hexaédricos. También presenta una desventaja y es que solo puede ser utilizada en dominios con geometrías simples (Monge, 2017).

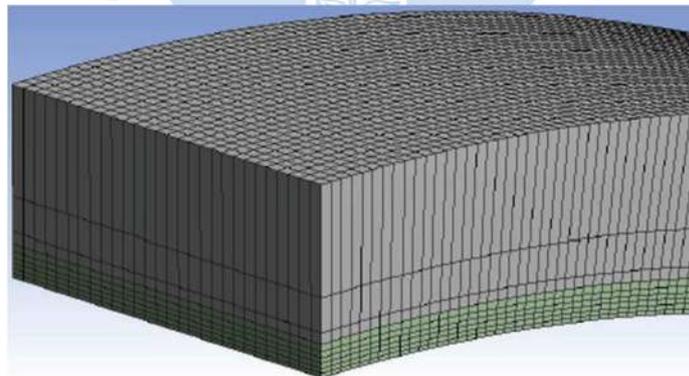


Figura 24. Malla estructurada.

Fuente: Monge, 2017.

- **Malla mixta:** en este tipo se combina los diferentes tipos de malla explicados anteriormente. Se recomienda su uso cuando las geometrías no son uniformes sino una combinación entre formas simples y curvas. Cuando se utiliza este tipo se debe tener especial cuidado en el acoplamiento de las diferente mallas utilizadas, ejemplo se muestra en la Figura 25 (Monge, 2017).

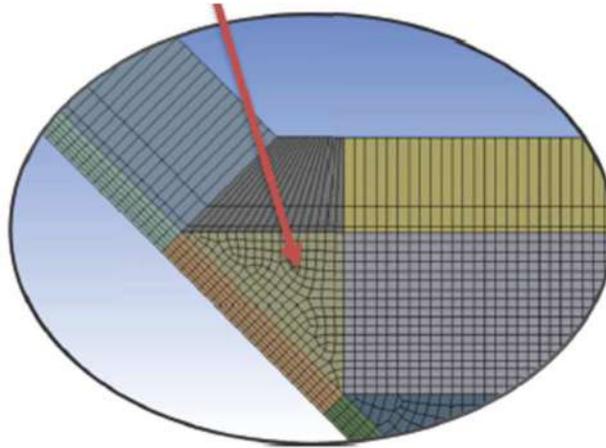


Figura 25. Malla mixta.

Fuente: Monge, 2017.

2.2.3.2. Parámetros de calidad de mallado

La calidad de la malla es un factor esencial para garantizar la precisión y estabilidad del cálculo numérico. Al usar un mallado con elementos de gran tamaño respecto al volumen de control, se obtienen resultados poco confiables; por el contrario, al usar mallados refinados se tendrían resultados más precisos. La desventaja de refinar demasiado una malla es que se necesitaría un tiempo de simulación demasiado largo. Por esta razón es necesario verificar la calidad de la malla a través de parámetros de calidad de malla. Entre los principales parámetros se encuentran (Castillo Falcón, 2016):

1. **Calidad del elemento** (*Element quality*): el valor de este parámetro oscila entre 0 y 1. Se recomienda que el mallado obtenido tenga un valor cercano a uno, dado que representa la calidad del elemento respecto a un cubo perfecto.
2. **Oblicuidad** (*Skewness*): se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Este parámetro mide la distorsión de los elementos de la malla, un valor de oblicuidad cercano a 1 indica una distorsión alta lo que puede reducir la precisión y estabilidad de la simulación afectando la convergencia. Su valor oscila entre 0 y 1; tendiendo una excelente calidad de celda, los elementos de la malla que van de 0 a 0.25, una buena calidad de 0.25 a 0.50 y una calidad media con valores entre 0.50 a 0.75 (Castillo Falcón, 2016).
3. **Aspecto del elemento** (*Aspect ratio*): ayuda a determinar el alargamiento de una celda. Se calcula a través de la razón entre los valores que se especifican en la Figura 26. Se recomienda que no supere el valor de 3, siendo la mejor relación de aspecto la que equivale a la unidad. En general, es mejor evitar grandes cambios en este parámetro en zonas donde el flujo sufre grandes cambios o fuertes gradientes (Castillo Falcón, 2016).

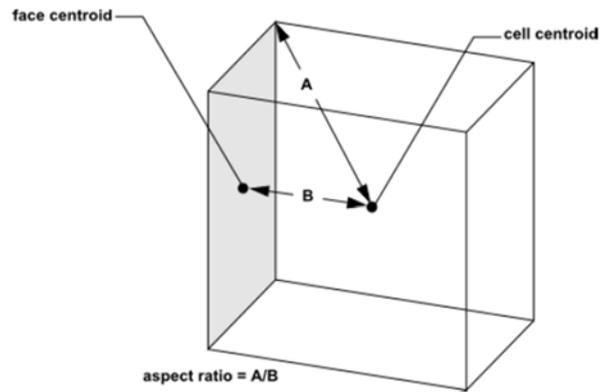


Figura 26. Cálculo de la relación de aspecto en una celda.

Fuente: ANSYS. INC, Fluent Users Guide, 2017.

4. **Ortogonalidad** (*Orthogonal quality*): se define como el mínimo de los productos escalares normalizados en la Ecuación 1 – 31, los términos de la ecuación se presentan en la Figura 27. El rango de valores de este parámetro varía entre 0 y 1. Es aconsejable que este valor este cercano a la unidad, lo que significa que los elementos tienden a tener ángulos cercanos a 90 facilitando así la labor de cálculo para el software (ANSYS. INC, Fluent Users Guide, 2017).

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{f}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|}$$

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|}$$

Ecuación 1 – 31

Donde:

\vec{A}_i : Vector área de la cara i.

\vec{f}_i : Vector que va desde el centroide de la celda hasta el centroide de la cara i.

\vec{c}_i : Vector que va desde el centroide de la celda hasta el centroide de la celda adyacente que comparte la cara i.

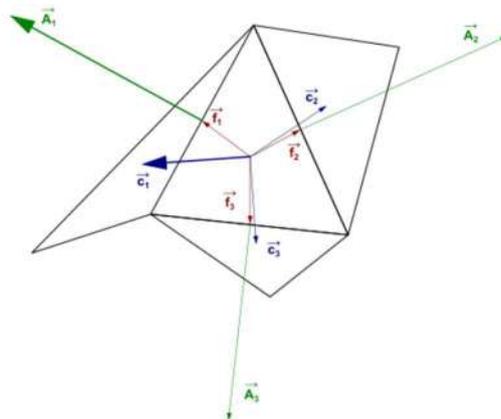


Figura 27. Vectores utilizados para calcular la ortogonalidad.

Fuente: ANSYS. INC, Fluent Users Guide, 2017.

2.2.4. Método numérico

Como ya se ha precisado, CFD es la ciencia que permite la predicción del flujo de los fluidos. ANSYS CFX utiliza las teorías de esta ciencia para resolver los fenómenos que se estudian en este módulo computacional, basándose en las ecuaciones de conservación de la masa, momento y energía. Sin embargo, es muy complicado obtener una solución analítica para flujos reales, se debe adoptar un enfoque numérico mediante el cual las ecuaciones se reemplacen por aproximaciones algebraicas que se pueden resolver utilizando un método numérico. ANSYS CFX utiliza un método de volúmenes finitos (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).

El proceso consiste:

1. Descomponer el dominio en volúmenes de control.
2. Formular las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control.
3. Aproximar numéricamente las integrales.
4. Aproximar los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables nodales.
5. Ensamblar y resolver el sistema algebraico obtenido.

2.2.4.1. Método de volúmenes finitos

Este método discretiza el dominio utilizando una malla, esto implica dividir el dominio en un conjunto de volúmenes de control. En el centroide de cada uno de los volúmenes de control se calculan las variables (Figura 28). La malla se usa para construir volúmenes finitos, en los que se conserva cantidades relevantes como masa, momento y energía (ANSYS. INC, CFX Solver theory guide, 2016).

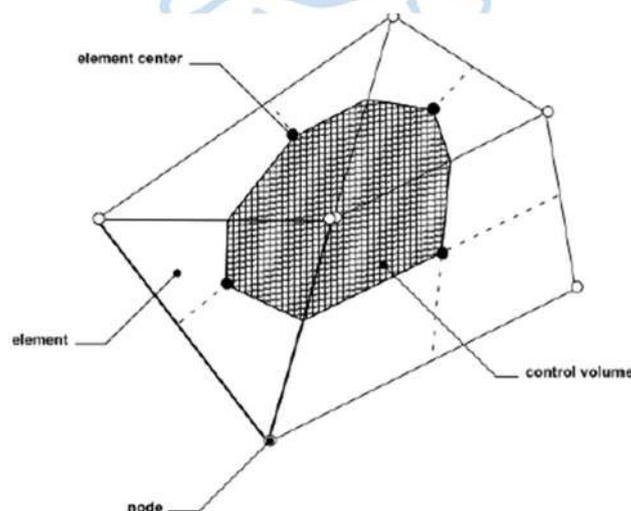


Figura 28. Definición de volumen de control.

Fuente: ANSYS. INC, CFX Solver theory guide, 2016.

La Figura 28 muestra una malla bidimensional típica. Todas las variables de solución y propiedades de fluido se almacenan en los nodos (vértices de malla). Se construye un volumen de control (el área sombreada) alrededor de cada nodo de malla utilizando la mediana dual (definida por líneas que unen los centros de los bordes y los centros de elementos que rodean el nodo) (ANSYS. INC, CFX Solver theory guide, 2016).

La metodología de volumen finito considera las ecuaciones de conservación para masa, momento y un escalar pasivo. Estas ecuaciones se integran sobre cada volumen de control, y el teorema de divergencia de Gauss se aplica para convertir integrales de volumen que involucran operadores de divergencia y gradiente en integrales de superficie. Si los volúmenes de control no se deforman en el tiempo, las derivadas de tiempo se pueden mover fuera de las integrales de volumen y las ecuaciones integradas se convierten en (ANSYS. INC, CFX Solver theory guide, 2016):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho U_i dV + \int_s \rho U_j U_i dn_j \\ = - \int_s P dn_j + \int_s \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V s_{U_i} dV \end{aligned} \quad \text{Ecuación 1 – 32}$$

Donde

V y s : denotan las regiones de integración de volumen y superficie.

dn_j : componentes cartesianos diferenciales del vector de superficie normal exterior.

Las integrales de volumen representan términos de fuente o acumulación, y las integrales de superficie representan la suma de los flujos. El siguiente paso en el algoritmo numérico es discretizar las integrales de volumen y superficie. Las integrales de volumen se discretizan dentro de cada elemento y se acumulan en el volumen de control al que pertenece el sector (ANSYS. INC, CFX Solver theory guide, 2016).

2.2.4.2. Ecuaciones de conservación

El solucionador con el que cuenta el software ANSYS CFX resuelve el conjunto de ecuaciones inestables de Navier-Stokes en su forma de conservación. Sabemos que la base de estas ecuaciones son las ecuaciones de transporte de masa, momento y energía, cuya denotación se detalló en el acápite 3.1.5. Se basa en el método de volúmenes finitos, primero se discretiza el dominio en un set de volúmenes de control y las ecuaciones de transporte o de conservación son resueltas por el solucionar en este conjunto de volúmenes de control (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi \, dV + \oint_A \rho \phi V \cdot dA = \oint_A \Gamma_\phi \nabla_\phi \cdot dA + \int_V S_\phi \, dV \quad \text{Ecuación 1 – 33}$$

inestable + advección = difusión + generación

CFX incluye una variedad de modelos multifásicos para permitir la simulación de múltiples flujos de fluidos, como son burbujas, gotas y flujos de superficie libre (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).

2.2.5. Modelos de turbulencia

Los modelos de turbulencia se utilizan para predecir los efectos de la turbulencia en el flujo sin resolver todas las escalas de las fluctuaciones turbulentas más pequeñas, y de esta manera tener un menor tiempo el procesamiento. Es necesario seleccionar de forma adecuada el modelo de turbulencia para garantizar una solución apropiada del flujo. Esta selección es de responsabilidad del usuario y debe conocer las características del flujo que se evaluará.

ANSYS CFX cuenta con modelos de turbulencia *Large Eddy Simulation* (LES) y de *Detached Eddy Simulation* (DES). Esta clase de modelos de turbulencia no se basa en las ecuaciones de RAN y usan funciones avanzadas de pared para modelar el flujo cercano a la misma (Jaramillo Mejía, 2017).

ANSYS CFX dispone de un número elevado de modelos de turbulencia. Algunos son útiles para aplicaciones bien específicas, otros pueden ser aplicados en un amplio espectro de flujos con razonable grado de precisión. Los modelos de turbulencia disponibles en ANSYS CFX son los siguientes (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016):

a) *Eddy-viscosity models:*

- *Zero equation model.*
- *Standard $k - \varepsilon$ model.*
- *RNG $k - \varepsilon$ model.*
- *Standard $k - \omega$ model.*
- *Baseline (BSL) zonal $k - \omega$ based model.*
- *SST zonal $k - \omega$ based model.*

b) *Reynolds stress models (RSM):*

- *Launder, Reece and Rodi Quasi-Isotropic model (QI Reynolds Stress).*
- *Speziale, Sarkar and Gatski (SSG Reynolds Stress).*
- *SMC- ω model (Omega Reynolds Stress).*
- *Launder, Reece and Rodi Isotropization of Production model (LRR Reynolds Stress).*

- *Baseline (BSL) Reynolds stress model.*

Los principales modelos de turbulencia utilizados en modelaciones de estructuras hidráulicas. se describen a continuación:

A. Modelo k-epsilon (ϵ): Considerado el modelo estándar de la mayoría de códigos CFD. Su popularidad se debe a que ha demostrado ser estable y numéricamente robusto; puede ser usado en simulaciones de propósito general asegurando obtener resultados robustos y precisos. Utiliza el enfoque escalable de función de pared para mejorar la robustez y precisión cuando la malla cerca de la pared es muy fina (ANSYS. INC, CFX Solver theory guide, 2016).

Existen algunas aplicaciones para las que este modelo puede no ser adecuados. Entre estos están flujos con separación de capa límite, flujos con cambios repentinos en la tasa de deformación media, flujos en fluidos rotativos y fluye sobre superficies curvas (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016).

B. Modelo k-omega (ω): Los modelos estándar de turbulencia de dos ecuaciones a menudo no pueden predecir el inicio y la cantidad de separación de flujo en condiciones adversas de gradiente de presión, por esta razón predicen el inicio de la separación demasiado tarde y subestiman la cantidad de separación más adelante. La mayor ventaja de utilizar el modelo k – ω , es que posee una formulación específica para el cálculo de los efectos del fluido cerca de la pared para situaciones donde se presentan números de Reynolds bajos; de esta forma se obtienen resultados más precisos (ANSYS. INC, CFX Solver theory guide, 2016).

En conclusión, el modelo k – ω es mejor que el k – ϵ para flujos de capa límite; dado que en este último se requiere realizar un mayor refinamiento en paredes para obtener resultados significativos. Además, se utiliza para flujos separados o en transición. El modelo k – ω es sensible a las condiciones de corriente libre lo que representa una desventaja respecto al uso del modelo k – ϵ , con el que no sucede (ANSYS. INC, CFX Solver theory guide, 2016).

C. Modelo SST (Shear Stress Transport): Este modelo fue diseñado para resolver las debilidades que presentan los modelos k – ω y k – ϵ , es decir da predicciones altamente precisas del inicio y la cantidad de separación de flujo bajo gradientes de presión adversos mediante la inclusión de efectos de transporte en la formulación de la viscosidad, resolviendo así con alto grado de precisión la separación del flujo de la pared. Su formulación está basada en transporte de esfuerzo cortante (ANSYS. INC, CFX Solver theory guide, 2016).

Este modelo es aconsejable para simulaciones de capa límite de alta precisión. El modelo SST supera las debilidades de los modelos $k - \omega$ y $k - \epsilon$, es decir, no es sensible a las condiciones de corriente libre y presenta buenos resultados en flujos de capa límite. Para ello, toma en cuenta el transporte de los esfuerzos cortantes turbulentos, previniendo la sobre predicción de la viscosidad turbulenta. Para flujos de corte libre, el modelo SST es idéntico al $k - \epsilon$ modelo.

2.2.6. Modelos multifase

La morfología describe la conectividad o distribución del fluido, ya sea que forme un único medio continuo o si está presente, por ejemplo, en pequeñas gotas que no están conectadas. El software ANSYS CFX presenta dos modelos distintos disponibles: el modelo homogéneo y el modelo de transferencia interfuida o no homogéneo. Estos modelos permiten la simulación de burbujas, gotas, corrientes de fluidos y flujos de superficie libre (Jaramillo Mejía, 2017).

Los modelos multifase disponibles en CFX son los siguiente (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016):

- a. **Modelo no homogéneo:** un flujo multifase no homogéneo hace referencia a la situación donde existe un campo de velocidad separado para cada fase, una fase representa a un fluido sea líquido o gas. Sin embargo, el campo de presión es compartido por todos los fluidos. Los modelos de partículas y mezclas son modelos multifásicos no homogéneos. El modelo no homogéneo se basa en el enfoque de Euler-Euler. En los modelos Euler-Euler todas las fases son tratadas como continuas.
- b. **Modelo homogéneo:** un flujo multifase homogéneo es un caso limitante del flujo multifásico Eulerian-Eulerian donde todos los fluidos comparten los mismos campos de velocidad, así como otros campos relevantes como temperatura, turbulencia, etc. El campo de presión también es compartido por todos los fluidos. En conclusión, comparten los campos de velocidad y el de presión, siendo todas las fases tratadas como continuas, sin permitir que estas se combinen.

2.2.7. Flujos en superficie libre

Este tipo de flujos multifásicos comprenden una situación en la que existen dos fluidos, que presentan una interfaz discernible que los separa. Para el caso de canales se le llama superficie libre a la interfaz que separa el aire del agua. ANSYS CFX cuenta con el modelo homogéneo y el no homogéneo; por ejemplo, corresponde a un canal abierto el modelo homogéneo y a una ola el no homogéneo (ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016).

Otro concepto esencial en la modelación de flujos multifase es el volumen de fracción o *Volume Fraction*, empleando la noción de interpenetración continua. ANSYS CFX considera como unidad de volumen a cada volumen finito en que se divide el dominio, estos volúmenes son llamados volúmenes de control. Las fases están presentes en cada volumen de control, y se les asigna una fracción de volumen igual a la que ocupan respecto al volumen total del elemento. Por ejemplo, se considera que el espejo de agua se presenta cuando el volumen de fracción es igual a 0.5; es decir en los volúmenes finitos se encuentra presente la mitad del volumen con la fase agua y la mitad con la fase aire (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016).

Entre las principales practicas recomendadas para la modelación de este tipo de flujo tenemos (ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016):

1. Cuando la fase dispersa (aire) queda atrapada en la fase continua (agua), presenta mejores resultados el modelo no homogéneo. Para realizar la elección entre los modelos multifase es necesario considerar las propiedades físicas de los fluidos.
2. Debido al concepto del volumen de fracción o *volumen fraction*, la interfaz entre las fases puede volverse borrosa pudiendo afectar los resultados de la modelación. Por esta razón es necesario refinar el mallado entre los límites de las fases, para así tener unos mejores resultados. Una técnica muy usada consiste en crear un subdominio que comprenda la interfaz entre las fases y aumentar la densidad de la malla en el mismo como se muestra en la Figura 29.

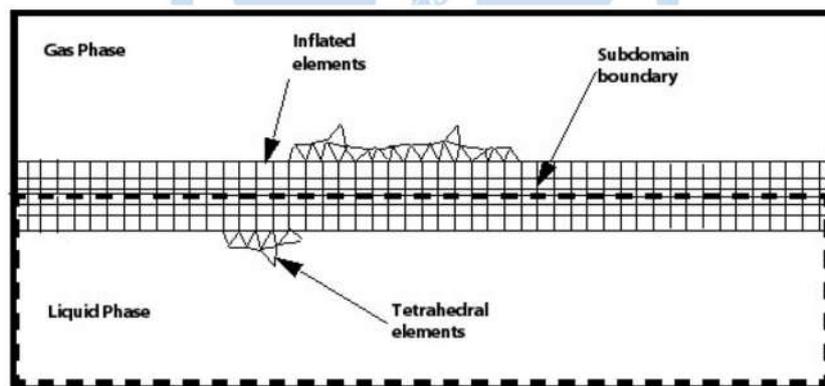


Figura 29. Refinamiento de mallado en superficie libre.

Fuente: ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016.

Otra forma de aumentar la densidad de la malla en los límites de la superficie libre es utilizando la opción de malla adaptativa o *mesh adaption*. Con esta herramienta el programa automáticamente refina el mallado en la superficie libre mejorando la resolución del mallado en la región de la interfaz y con esto los resultados de la modelación.

3. Otra configuración recomendada para flujos de superficie libre es seleccionar el algoritmo de solución de fracción de volumen acoplado o *Coupled volume fraction solution algorithm*. Para reducir las dificultades de convergencia encontradas en algunos problemas de flujo multifásico, aplicando así un parámetro de relajación internamente en el solucionador.

2.2.8. Tipos de análisis

Al configurar una modelación en ANSYS CFX se requiere definir el tipo de análisis y los modelos físicos anteriormente mencionados. Los tipos de análisis están sujetos a cierta dependencia del tiempo, según este criterio pueden distinguirse simulaciones de estado estacionario y simulaciones transitorias.

En algunos casos, las simulaciones ejecutadas en estado estacionario no convergen. Esta situación se presenta cuando se ve un comportamiento oscilatorio en las gráficas de residuales. Si se modifica el tamaño del paso del tiempo y el gráfico residual se mantiene igual, indicaría que se necesita un análisis transitorio.

2.2.8.1. Simulaciones de estado estacionario

En este tipo de análisis se asume un cierto intervalo de tiempo, el cual es relativamente largo; en este intervalo se suponen condiciones estables que no cambian con el tiempo. Por esta razón no se requiere información en tiempo real para describirlos. En la práctica encontramos muchos flujos que alcanzan una condición estable después de su desarrollo inicial, estos pueden ser modelados haciendo uso de este tipo de análisis (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016).

En simulaciones de estado estacionario es necesario especificar el control de escala de tiempo del fluido, entre las opciones que se pueden configurar se encuentran (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016):

- ***Auto timescale:*** cuando se configura esta opción, el software usa una escala de tiempo física que se calcula internamente. ANSYS CFX se basa en las condiciones de frontera, condiciones del flujo, la física del problema y la geometría para calcular esta escala de tiempo. Se debe tomar en cuenta que la calculada por el software suele ser conservadora, lo que ocasiona que se tarde más tiempo en alcanzar la convergencia.
- ***Physical timescale:*** permite que el solucionador utilice una escala de tiempo fija para todo el sistema de ecuaciones y en todo el dominio. La escala de tiempo física resulta de la razón entre la longitud recorrida por el flujo y la escala de velocidad, esto se cumple

en flujos dominados por advección; es decir es el tiempo que tarda un punto en el flujo en atravesar el dominio estudiado. Para muchas simulaciones, es fácil hacer una estimación de tiempo razonable basada en la longitud del dominio de fluido y la velocidad media.

- **Local timescale factor:** esta opción permite usar diferentes escalas de tiempo en diferentes regiones del dominio estudiado. Las escalas de tiempo más pequeñas se aplican a regiones del flujo donde la escala de tiempo local es muy corta (como el flujo rápido), y las escalas de tiempo más grandes a aquellas regiones donde la escala de tiempo es localmente grande (como el flujo lento). Esta opción es muy favorable cuando se presentan escalas de velocidad variadas en la simulación.

2.2.8.2. Simulaciones transitorias

Este tipo de análisis se utilizan cuando las simulaciones de estado estacionario no bastan para describir la naturaleza del flujo y así poder alcanzar la convergencia de la modelación. Estas simulaciones requieren información en tiempo real para encontrar los intervalos de tiempo en los que el solucionador calculara los campos del flujo. Se puede requerir un análisis transitorio si las condiciones de frontera cambian respecto a las iniciales, o también puede deberse a las características del flujo, las cuales son tan complejas que no se alcanza un estado estable. Por ejemplo, los flujos impulsados por la flotabilidad no tienen una solución estable y pueden requerir un análisis transitorio (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016).

En simulaciones transitorias, su dependencia del tiempo se especifica a través de la duración del tiempo (*Time duration*) y el paso del tiempo (*Time steps*) como se muestra en la Figura 31. La selección de un paso de tiempo apropiado es esencial para obtener buenas tasas de convergencia para la simulación. Los parámetros que se definen en un análisis transitorio son (Villarroel, 2015):

- **Time duration:** este parámetro define la duración de la simulación en tiempo real, indica al programa cuando finalizar la ejecución transitoria. El tiempo total de la simulación depende del tiempo de residencia del flujo el cual está definido por la siguiente expresión según la investigación de Villarroel (2015).

$$t_r = \frac{L_D}{c_m} \quad \text{Ecuación 1 – 34}$$

Donde:

L_D : longitud recorrida del flujo (m)

c_m : velocidad media del flujo (m/s)

Según Villarroel (2015), el tiempo total de simulación o *time duration* debe ser de 3 a 5 veces el tiempo de residencia del flujo. Se define en el software a través de la opción *Total time*, este parámetro es el tiempo real en el que finaliza el análisis transitorio relativo a un tiempo inicial (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).

- **Time steps:** es el intervalo de tiempo real o paso de tiempo en el que el solucionador resuelve el campo de flujo, se debe seleccionar de preferencia una fracción del tiempo total para así tener una cantidad exacta de pasos de tiempo. Se puede definir de las siguientes formas: *timesteps* (valor fijo), *timesteps for the run* (lista de *time steps*) y *adaptive* (una expresión); el paso de tiempo adaptativo automatiza el proceso de adaptar el tamaño del paso de tiempo (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).

El paso de tiempo se define con la siguiente formulación según Villarroel (2015):

$$\Delta t_t = \frac{C\Delta x}{c_m} \quad \text{Ecuación 1 – 35}$$

Donde:

C : número de Courant (debe tener un valor entre 2 y 10)

c_m : velocidad media del flujo (m/s)

Δx : Tamaño de elemento más pequeño en la zona de flujo libre para la malla media (m)

El tamaño del *Time Step* es un parámetro importante, debe de ser lo suficientemente pequeño para resolver las características del flujo. Por esta razón se debe tener cuidado al elegir los términos a utilizar en la Ecuación 1 – 35. Por ejemplo, si el número de Courant es mayor, el paso de tiempo será más grande y esto podría ocasionar que la simulación transcurra demasiado rápida como para capturar la parte fundamental del fenómeno tal como lo muestra la Figura 30 (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016).

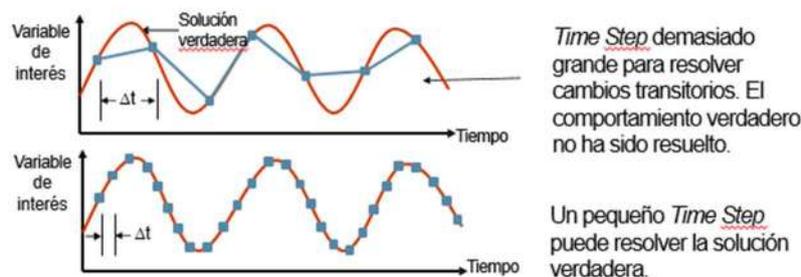


Figura 30. *Time step* en análisis transitorios.

Fuente: ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016.

- **Initial time:** corresponde al tiempo antes de comenzar el primer paso en la simulación actual. Puede configurar a través de las siguientes opciones: *automatic*, *automatic with value* y *value* (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).

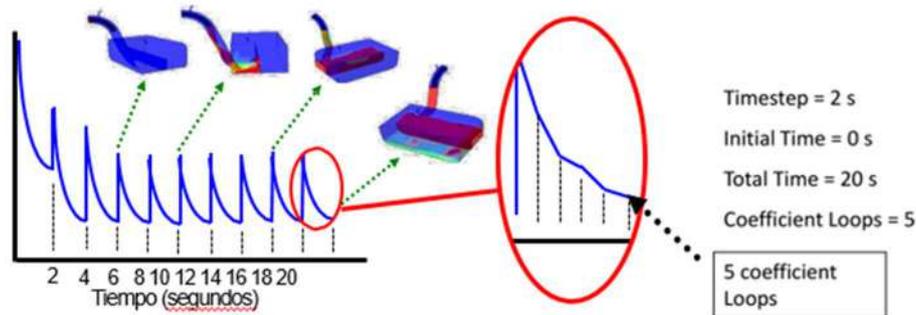


Figura 31. Parámetros de un análisis transitorio.

Fuente: ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016.

Los análisis transitorios son resueltos calculando una solución para múltiples puntos discretos en el tiempo, tal como se muestra en la Figura 31. Para cada punto en el tiempo, se itera una solución. Por esto el número de iteraciones en una solución transitoria viene dado al dividir el *time duration* seleccionado y el *time step* (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).

En conclusión, los análisis transitorios muestran un reflejo más real del comportamiento del flujo. Sin embargo, requieren un mayor tiempo de simulación, mayor costo computacional y mayor capacidad de almacenamiento en el ordenador. Por esta razón es necesario configurar la frecuencia en la que el software guarda los resultados de la modelación y así evitar que el archivo se torne pesado.

2.2.9. Criterios de convergencia

Para aceptar los resultados de una modelación es necesario verificar que ciertas condiciones se cumplan, considerando que se ha obtenido una malla adecuada y se han programado correctamente las condiciones iniciales y de frontera. Estos parámetros fundamentales son: los residuales, los imbalances y los puntos de monitoreo.

- **Los residuales:** existe este parámetro para evaluar la evolución de la solución. Se originan al momento de restar los valores de las variables determinados en el tiempo anterior con sus valores en el tiempo presente, es decir es la variación entre una iteración y la siguiente. Cada variable tiene un valor residual distinto, y en el software ANSYS CFX se estudia el residuo máximo normalizado (MAX) o el residuo promediado de todos los volúmenes de control (RMS: *Root Mean Square*) (Villarroel, 2015).

Los residuales son la medida más importante de convergencia, ya que relacionan directamente si las ecuaciones se han resuelto con precisión. Al evaluar los residuales promedio (RMS) se considera que cuando poseen un valor menor a 10^{-4} se puede obtener una buena comprensión del comportamiento del flujo (Figura 32). Con un valor

de 10^{-4} , la convergencia es relativamente flexible pero suficiente para muchas aplicaciones ingenieriles. Un RMS de 10^{-5} indica una buena convergencia, considerada suficiente para muchas aplicaciones ingenieriles. Finalmente, con RMS de 10^{-6} , se obtiene una convergencia excelente. En caso del residual MAX, se sigue el mismo criterio anterior, pero considerando los valores de residual 10 veces más grandes (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016).

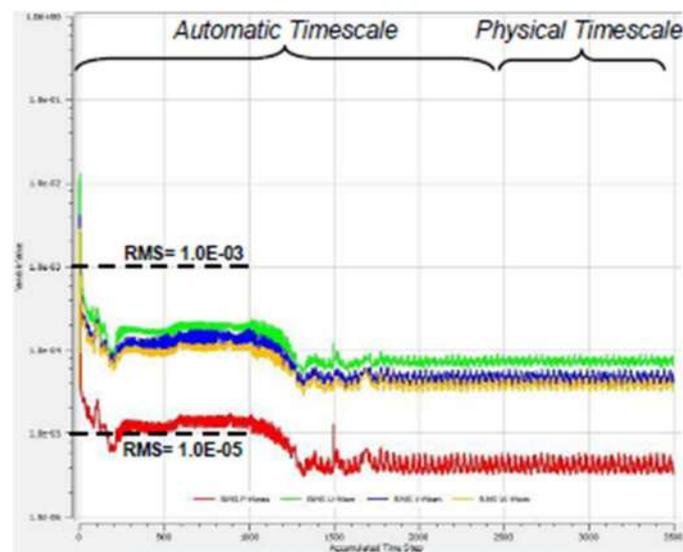


Figura 32. Evolución de residuales (Buena convergencia).

Fuente: Villarroel, 2015.

- **Los imbalances:** este parámetro existe para garantizar que se cumplan los equilibrios globales, es decir evalúan la conservación de masa, momentum y energía a lo largo de todo el dominio de simulación (Villarroel, 2015).

En el caso de análisis estacionarios, los imbalances se calculan restando el flujo de entrada con el flujo de salida de la variable para luego dividirla entre el flujo máximo por cada iteración. Sin embargo, en análisis transitorios se calculan por cada paso temporal considerándose una situación estacionaria en cada uno. Se considera que una modelación ha convergido cuando presenta imbalances inferiores a 1% en las diferentes variables (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016).

En la mayoría de simulaciones, cuando los residuales han convergido, se cumplirán los imbalances. Sin embargo, si estamos considerando una escala de tiempo muy grande en relación al fenómeno simulado puede suceder que los residuales cumplan antes que los imbalances (Villarroel, 2015).

- **Los puntos del monitoreo:** vienen a ser el último parámetro a considerar para aceptar los resultados de una modelación, consiste en evaluar ciertas variables de interés en ubicaciones determinadas del dominio. Esto con el fin de determinar el valor de esta

variable y monitorear su evolución de iteración en iteración, o en el tiempo para el caso de análisis transitorios (Villarroel, 2015).

Se puede aceptar este parámetro cuando las variables evaluadas en los puntos de monitoreo alcanzan un valor estable (Figura 33). En algunas simulaciones estacionarias se considera este parámetro como el más importante debido a que los residuos RMS no disminuyen, pero las variables si alcanzan una condición estable. Además, pueden existir variables que presenten un comportamiento oscilatorio debido a su naturaleza y no por un error numérico como el punto 3 y 4 de la Figura 33 (Villarroel, 2015).

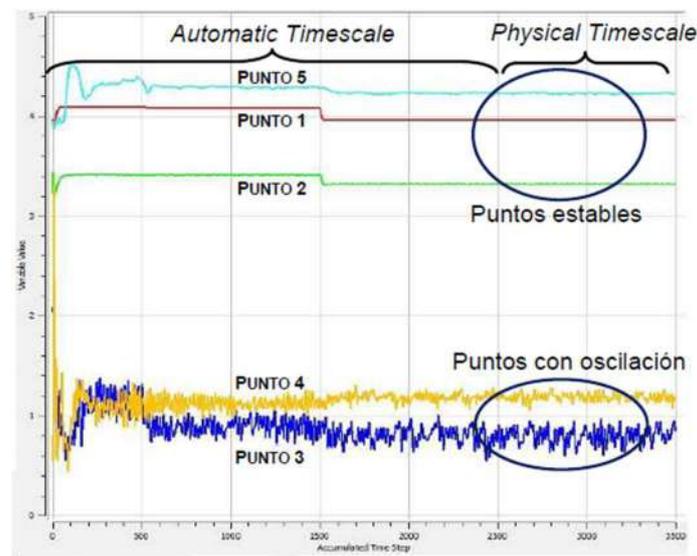


Figura 33. Evolución de puntos de monitoreo.

Fuente: Villarroel, 2015.

Finalmente, la solución de una modelación bien planteada se considera convergente y con resultados independientes del mallado cuando (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016):

- Los cambios o residuales de una iteración a la siguiente son insignificantes. El monitor de los residuos muestra esta tendencia
- La conservación de las propiedades, evaluada a través de los imbalances, es alcanzada.
- Las cantidades de interés, medidas a través de los puntos de monitoreo, han alcanzado valores constantes.

2.2.10. Conceptos teóricos

Se definirán a continuación algunos conceptos manejados por ANSYS CFX:

- **Presión de referencia** (*Reference Pressure*): representa la presión de referencia absoluta a partir de la cual todas las presiones relativas son medidas por el software. Las presiones especificadas en CFX son relativas a esta presión de referencia, como presión de

referencia se considera el valor de la presión atmosférica o 1 atm (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).

$$P_{abs} = P_{reference} + P_{relative} \quad \text{Ecuación 1 – 36}$$

- **Morfología** (*Morphology*): se utiliza para describir la conectividad o distribución del fluido, ya sea que forme un solo medio continuo o si está presente. Una fase continua o fluido continuo es uno que forma una región conectada continua, debido a la gran cantidad de moléculas que tiene un fluido presentan una distancia relativamente corta entre ellas por esto se considera como un medio continuo sin espacios vacíos entre moléculas (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).
- **Flotabilidad** (*Buoyancy*): cuando la gravedad actúa sobre el fluido con diferencias de densidad, surge la fuerza de flotación. Se debe configurar la densidad del fluido más ligero porque esto le da una interpretación intuitiva de la presión al programa (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).
- **Superficie libre** (*Free Surface*): es aplicable a flujos de superficie libre. El modelo de partículas o el modelo de mezcla también se puede usar para estos flujos si hay arrastre de una fase dentro de otra. El flujo de superficie libre se refiere a una situación multifásica en la que los fluidos (comúnmente agua y aire) están separados por una interfaz resoluble distinta (ANSYS. INC, CFX Introduction lectures trainee, 2016).
- **Flujo multifásico**: es un flujo compuesto por más de un fluido, mezclando sus componentes a escala macroscópica con una interfaz discernible entre los fluidos que lo componen. Cada fluido puede poseer su propio campo de flujo, o todos los fluidos pueden compartir un campo de flujo común (ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016).



Capítulo 3

Rápida hidráulica de Curumuy y generación de su geometría

3.1. Central Hidroeléctrica de Curumuy

La Central Hidroeléctrica de Curumuy (CHC) entró en funcionamiento a fines de 1997 (Figura 34). Es una central de pasada o agua fluente, es decir utiliza el agua mientras esta fluye normalmente por el cauce del río. Estas centrales no cuentan con ninguna clase de estructura para almacenamiento de agua, siendo utilizada la presa de derivación para elevar y mantener constante el nivel de agua que llega a las tuberías forzadas (Juárez, 2016).

La empresa propietaria y que tiene en concesión esta central es el Sindicato Energético S.A. (SINERSA). Se seleccionó esta estructura porque presenta flujo tridimensional, el cual podía ser estudiado en una modelación numérica. Además, debido a la cercanía que presenta facilita la toma de datos en campo y representa una de las estructuras hidráulicas más grandes de la región que forma parte del proyecto especial Chira Piura.



Figura 34. Vista panorámica de CH Curumuy.

Fuente: Risco, 2009.

3.1.1. Ubicación y objetivo

La central hidroeléctrica se ubica a 20 km de la ciudad de Piura en la costa norte del Perú; en la localidad de San Juan de Curumuy (Figura 35). Se encuentra al finalizar el Canal de

- Potencia instalada: 12,50 MW.
- Caudal nominal: 36,0 m³/s.
- Salto bruto: 39 m.
- 02 turbinas Kaplan: 6.25 MW.
- 02 generadores sincrónicos: 7,500 KVA.

3.1.3. Descripción de la obra

Las instalaciones de la central se encuentran conformada por los elementos principales que se describen a continuación (Figura 39):

- Bocatoma:** es una estructura encargada de captar el agua para derivarla desde el canal de derivación hacia la cámara de carga. Tiene compuertas de mantenimiento o *stop logs* cuya función es obstruir el flujo de agua para facilitar el mantenimiento de la cámara de carga. Además, posee una compuerta radial que ayuda a derivar el agua como lo muestra la Figura 36 y la Figura 37 (Juárez, 2016).



Figura 36. Bocatoma de la CH de Curumuy.

Fuente: Elaboración propia.

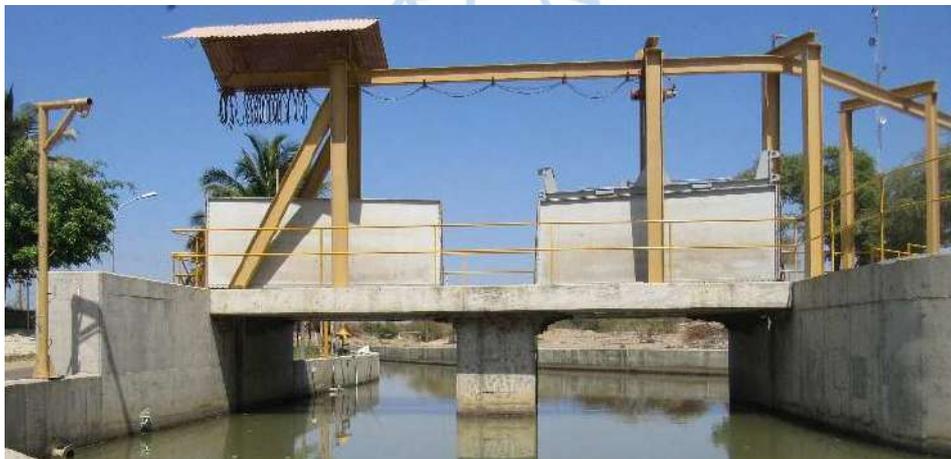


Figura 37. Vista posterior bocatoma y compuertas de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

- b. **Cámara de carga:** fue construida paralelamente al canal de derivación (Figura 38), con una longitud de carga de 100 m y con una forma adecuada a las condiciones hidráulicas del flujo. Su funcionamiento comprende un sistema de compuertas, válvulas y elementos de purga y limpieza (Risco, 2009).



Figura 38. Cámara de carga de CH de Curumuy.

Fuente: Elaboración propia.

- c. **Tubería forzada:** acorde al caudal de agua requerido, la potencia de generación y las características de las turbinas; se encuentran enterradas 2 tuberías de 2600 mm de diámetro y 180 m de longitud cada una. Conectan la cámara de carga con la sala de máquinas, conduciendo el agua hasta las turbinas. Actualmente estas tuberías cuentan, además de la protección con pintura, con un sistema de protección catódica a corriente impresa a fin de controlar la corrosión de las mismas (Risco, 2009). Previamente a la entrada de agua a esta tubería se encuentran las rejillas de protección que impiden el ingreso de vectores.
- d. **Casa de máquinas:** se encuentra a 17 m de profundidad del nivel del terreno natural y una elevación de 10 m. sobre dicho nivel. Las dimensiones han sido definidas por la operación de 2 turbinas y generadores de 6,25 MW cada una, estando todo el sistema eléctrico de mando y control en una casa especial ubicada junto a la casa de máquinas (Risco, 2009) .Además consta de 4 niveles: bahía de mantenimiento, nivel de generadores, nivel de turbinas y nivel de drenaje. Para acceder de un nivel a otro se hace uso de escaleras de concreto (Juárez, 2016).
- e. **Cámara de descarga:** es la estructura cuya función es descargar las aguas turbinadas al río Piura; sus dimensiones y forma se ajustan al diseño de la casa de máquinas y características topográficas de la zona de entrega (Risco, 2009).

- f. **Patio de llaves:** lugar en el que se encuentra los equipos de transformación de tensión de 10 kV a 60 kV y demás elementos eléctricos requeridos. El Patio de llaves consta de un transformador de 15 MVA, interruptor tripolar, transformadores de corriente, seccionador tripolar, transformadores de tensión y pararrayos (Risco, 2009).
- g. **Rápida hidráulica:** es la estructura encargada de llevar el caudal excedente o no turbinado de la cámara de carga hasta el cauce del río Piura. Se explicará un poco más a detalle en la siguiente sección de esta investigación.



Figura 39. Elementos que conformar la central hidroeléctrica.

Fuente: Juárez, 2016.

3.2. Rápida hidráulica de Curumuy

La rápida hidráulica de Curumuy se encarga de conducir las aguas de la cuenca del río chira que discurren por el canal de derivación Daniel Escobar hasta el río Piura. Además, tiene una estructura tradicional como la mencionada en la sección 1.1.8 y entre sus principales elementos se encuentran: transición de entrada, canal de rápida y la poza disipadora. Presenta un desnivel de 43.1 m y una longitud de 210.42 m como se muestra en la Figura 40.



Figura 40. Rápida hidráulica de la central hidroeléctrica de Curumuy.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Objetivos

Entre las principales funciones que cumple esta estructura se encuentran:

- Conducir el caudal excedente de la cámara de carga hasta la cuenca del río Piura con un desnivel de 40 m entre el punto inicial y final de la misma.
- Conducir el caudal total del canal de derivación cuando se realicen labores de mantenimiento en las tuberías forzadas o la cámara de carga.
- Reducir la energía del flujo antes de su llegada al cauce del río Piura y así evitar la erosión del mismo.

3.2.2. Descripción de la obra

La rápida hidráulica de la central hidroeléctrica de Curumuy presenta los siguientes elementos (Figura 44):

- Transición de entrada: tiene una longitud de 30 m y une las dos secciones transversales descritas en la Figura 42 como se muestra en la Figura 41.



Figura 41. Transición de entrada de la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

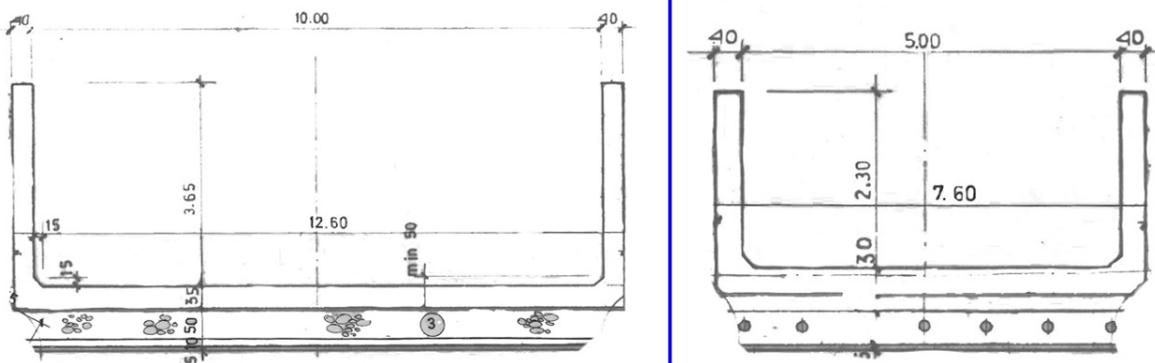


Figura 42. Secciones transversales de la transición de la rápida.

Fuente: PECHP.

- Canal de rápida: se encarga de transportar el agua desde la transición hasta la trayectoria, tiene un desnivel 31 m aproximadamente, como lo muestra la Figura 43 y tiene una longitud de 111.92 m. En su tramo inicial presenta una pendiente de 15 % aproximadamente y 43 % en el segundo tramo.



Figura 43. Segundo tramo del canal de rápida.

Fuente: Elaboración propia.

- Trayectoria: parte de la estructura encargada de unir el canal de rápida con la poza disipadora.
- Poza disipadora: disipa la energía del agua a través de un resalto hidráulico. Tiene una longitud de 51 m y una altura de 9.5 m. Presenta 5 dados que ayudan a disipar la energía del agua.

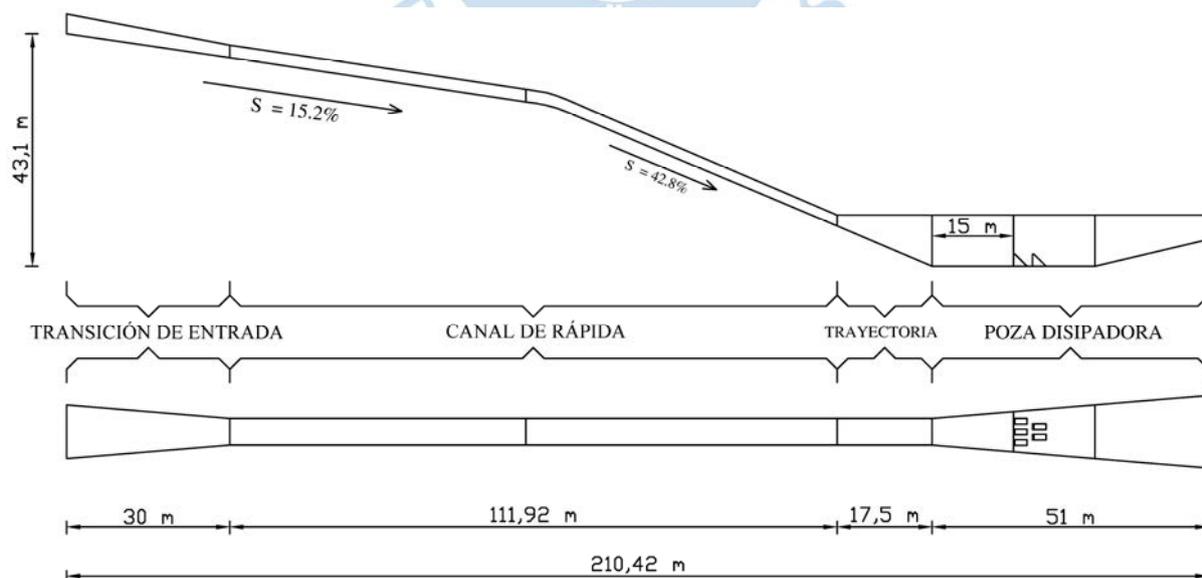


Figura 44. Elementos de la rápida hidráulica de la central hidroeléctrica de Curumuy.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Modelado en 3D de la cámara de carga y rápida hidráulica

Conociendo las partes de las estructuras hidráulicas estudiadas que se modelaran, cámara de carga y rápida hidráulica, en este capítulo se detallará el proceso para obtener el modelo en 3 dimensiones. Para realizarlo se utilizó el software SolidWorks por la complejidad de la geometría.

SolidWorks es un software CAD (*Computer Aided Design*) orientado al diseño asistido por computadora. Representa una solución integral de diseño 3D, incorporando potentes herramientas de diseño. Además, representa una aplicación de automatización de diseño que les permite a los diseñadores croquizar ideas con rapidez, experimentar con operaciones y cotas, y producir modelos y dibujos detallados (Moreno, 2016). En este proceso de generación de la geometría se tuvieron las siguientes ventajas al utilizar este software:

- SolidWorks tiene una interfaz amigable para el usuario.
- Facilidad para exportar en formatos compatibles con el módulo de geometría de ANSYS tales como IGES, Parasolid, Parasolid binary, etc.
- Es versátil para la edición de la geometría, lo que ayuda a simplificarla. Además, se pueden partir los sólidos modelados facilitando el refinado de malla en donde se requiere.
- El software cuenta con una gran variedad de herramientas, y ofrece la posibilidad de crear, diseñar, simular y gestionar los datos del proceso de diseño.

3.3.1. Herramientas de modelado

Este acápite ha sido redactado tomando como referencia el manual de conceptos del software elaborado por SolidWorks Corporation (2005) y la investigación de Moreno (2016). El programa presenta tres tipos de archivos: piezas, ensamblajes y dibujos.

- **Piezas:** son los elementos principales y se obtiene a partir de operaciones 3D. Cada uno de los ensamblajes y dibujos se obtienen a partir piezas. Algunos ejemplos de piezas son pernos, espigas, chapas, etc
- **Ensamblajes:** consisten en la combinación varias piezas que encajan mediante relaciones de posición. Además, se puede crear ensamblajes a partir de sub ensamblajes.
- **Dibujos:** es una representación 2D de una pieza o un ensamblaje 3D.

Así como un ensamblaje está compuesto por piezas individuales, un modelo en SolidWorks está compuesto por elementos individuales u operaciones. El software trabaja con operaciones geométricas inteligentes y fáciles de entender, algunas son extrusiones, cortes y redondeos. Conforme se va realizando la tarea de modelado se crean estas operaciones, las cuales se van aplicando a la pieza para ir constituyéndola.

Para realizar una pieza se croquiza o crea un dibujo en 2D, luego se colocan las cotas respectivas en el croquis y finalmente se procede a generar el sólido utilizando las herramientas de operaciones en 3D como se muestra en la Figura 45 al utilizar la herramienta de extrusión para generar un operación.

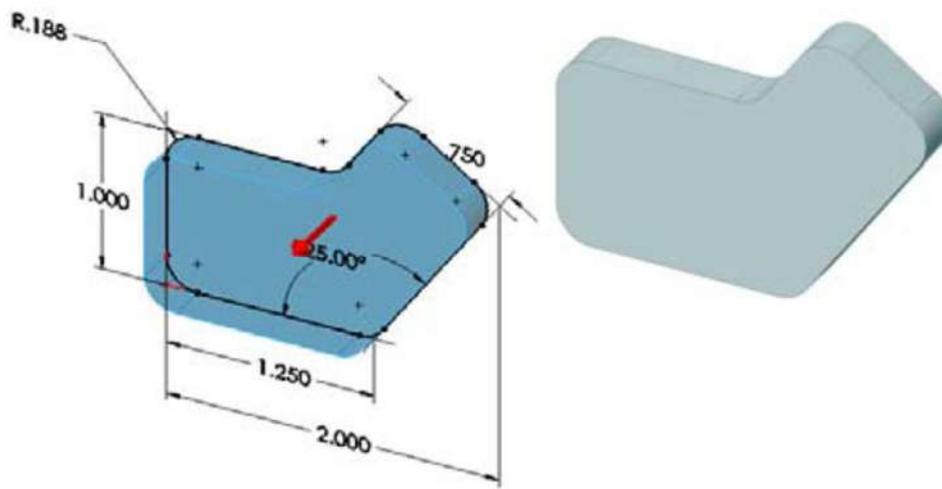


Figura 45. Croquizado en 2D y extrusión.

Fuente: SolidWorks Corporation, 2005.

El software cuenta con muchas herramientas para realizar operaciones en 3D y 2D, y se dividen en los siguientes tipos:

- **Herramientas de croquis:** utilizada para crear los croquis en dos dimensiones que son la base para las piezas creadas. Algunas de las herramientas principales son (Figura 46):
 - Croquis: crea un nuevo croquis o edita uno existente.
 - Cota inteligente: crea una cota para una o varias entidades seleccionadas.
 - Herramientas para crear entidades: línea, círculo, spline, elipse, rectángulo y ranura.



Figura 46. Herramientas de croquis.

Fuente: Elaboración Propia.

- **Herramientas de operaciones en 3D:** son utilizadas para crear la geometría en 3 dimensiones a partir de los croquis dibujados. Algunas de las principales son (Figura 47):
 - Extruir saliente/base: extruye un croquis o contornos de croquis seleccionados en una o dos direcciones para generar un sólido.
 - Revolución de saliente/base: crea una revolución de un croquis o contornos de croquis seleccionados con respecto a un eje para generar un sólido.

- Extruir corte: corta un modelo sólido extruyendo un perfil croquizado.



Figura 47. Herramientas de operaciones en 3D.

Fuente: Elaboración propia.

- **Herramientas de operaciones de superficie:** son utilizadas para crear geometría del tipo superficie, es decir no se genera geometría sólida. Algunas de sus principales herramientas son: extruir, revolución, barrido, recubrir y superficie límite (Figura 48).

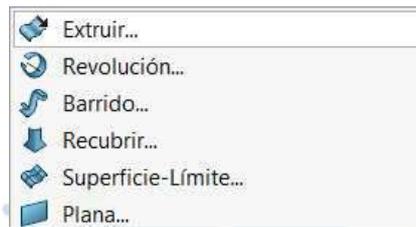


Figura 48. Operaciones de superficie.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Planos utilizados

La información base para realizar el modelado de estas estructuras fueron los planos proporcionados por el PECH (Proyecto especial Chira Piura) y SINERSA (Sindicato energético S.A.). Los planos de la rápida hidráulica fueron proporcionados por el PECH y la cámara de carga por SINERSA, respectivamente.

Planos de la rápida hidráulica son los siguientes:

- **KIII – 1:** Canal de acceso (Anexo A 1).
- **KIII – 2:** Secciones longitudinal y transversal (Anexo A 2).
- **KIII – 3:** Plano de la rápida (Anexo A 3).
- **KIII – 4:** Situación del colchón de agua al final de la caída de Curumuy (Anexo A 4).
- **KIII – 5:** Plano y secciones a través del diafragma (Anexo A 5).
- **KIII – 6:** Detalle de los gaviones (Anexo A 6).
- **KIII – 7:** Detalles de revestimiento de acero de los dientes de amortiguación (Anexo A 7).
- **KIII – 8:** Umbral vertedero Km. 53 + 866.11. Plano del encofrado (Anexo A 8).

3.3.3. Herramientas utilizadas

Para realizar el modelo en 3D de las estructuras se utilizó las herramientas de tipo superficie, dibujando parte del canal de derivación para luego modelar la cámara de carga y

posteriormente la rápida hidráulica. Se croquizó las secciones transversales del canal de derivación Daniel Escobar, así como también las secciones que corresponden a la rápida hidráulica y se utilizó la herramienta recubrir para generar la geometría. Es decir, en un plano transversal se generó un croquis y en un plano longitudinal se generó una trayectoria; para finalmente utilizar la herramienta 3D de recubrir como se muestra en la Figura 49.

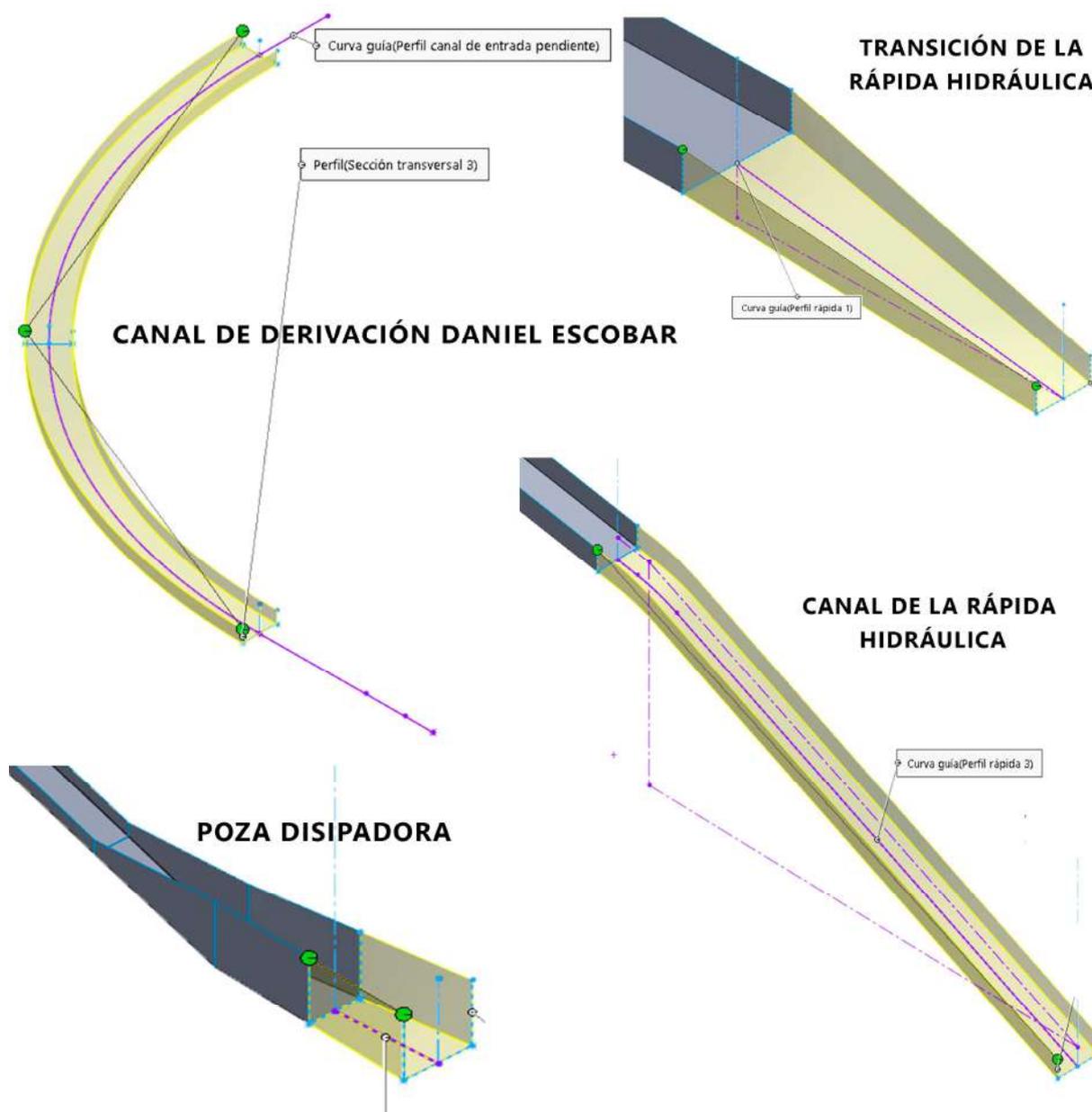


Figura 49. Geometría canal de derivación Daniel Escobar y rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Además, se modeló la geometría correspondiente a los datos de disipación contenidos en la poza disipadora y el vertedero que se encuentra después de la compuerta radial presente en la estructura. Para la modelación del vertedero se utilizó la herramienta “Saliente/Base barrido”, utilizando una sección transversal del perfil y una trayectoria (Figura 50).

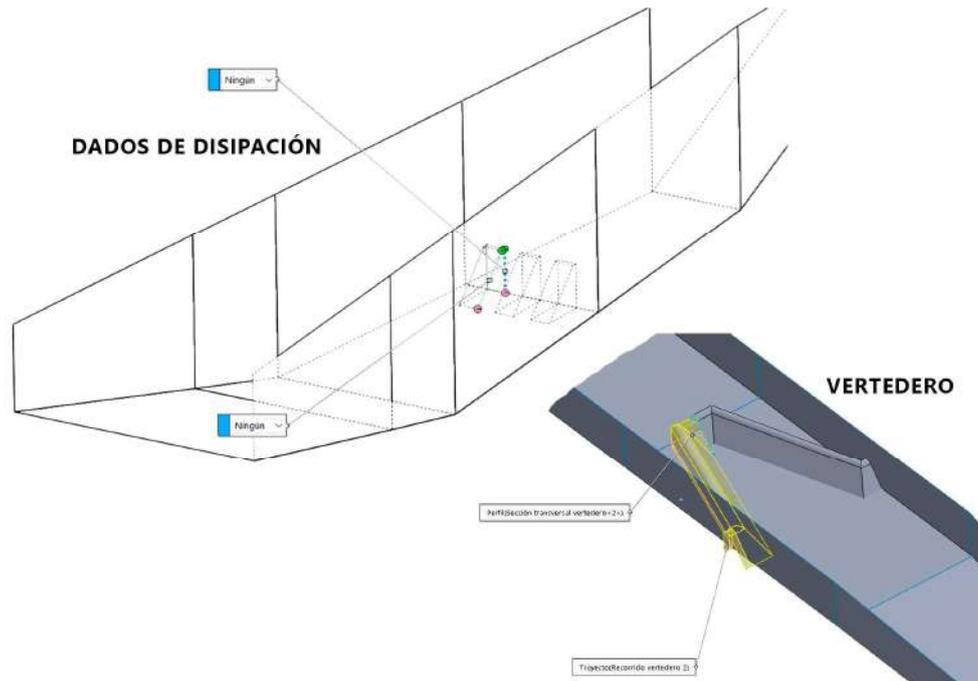


Figura 50. Datos de disipación y vertedero.

Fuente: Elaboración propia.

Se generó también la geometría de la cámara de carga y bocatoma, haciendo uso de las herramientas de operaciones de superficie con las que cuenta SolidWorks. Se utilizaron herramientas como extruir, recubrir, barrido y superficie-limite; teniendo como resultado la geometría que se presenta en la Figura 51.

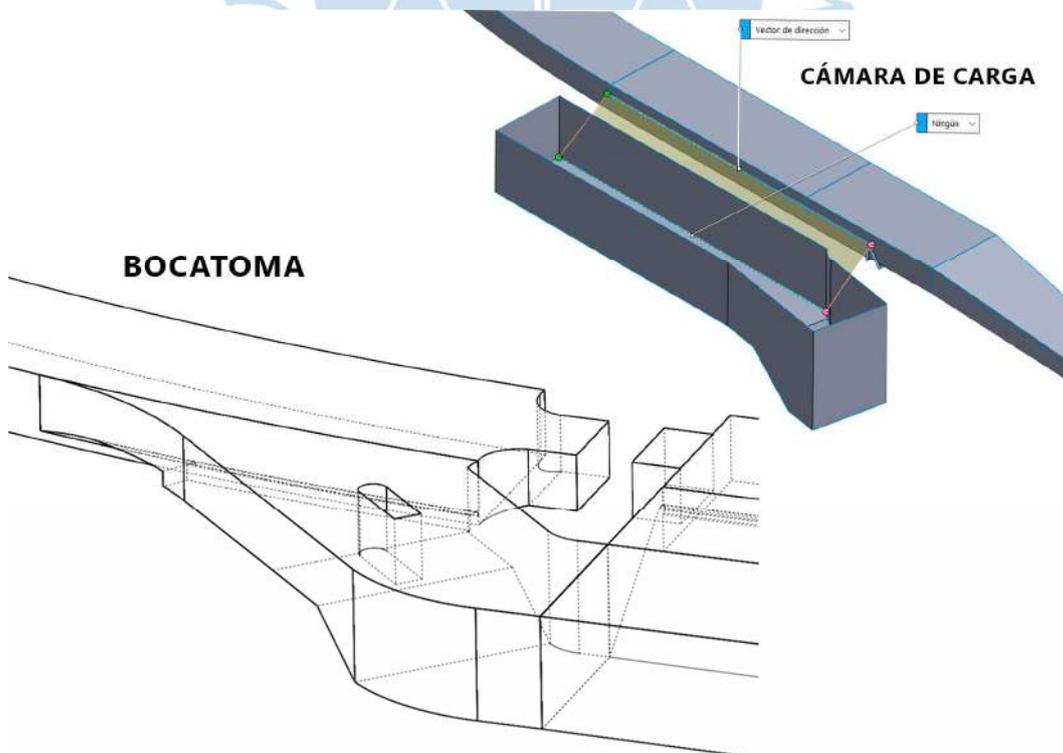


Figura 51. Geometría de Bocatoma y Cámara de Carga.

Fuente: Elaboración propia.

Durante el proceso de modelación, se consideró necesario realizar algunas simplificaciones de la geometría (Figura 52) real dado que eran irrelevantes para la simulación se realizaron las siguientes simplificaciones:

1. Se eliminó todos los chaflanes y redondeos de la geometría.
2. Se eliminó parte del canal de derivación modelado, debido a que estaba fuera del área de interés, considerando solo 100 m aproximadamente.
3. Se idealizó partes de la geometría.
4. Se eliminó parte del canal de derivación cortando la geometría donde se encuentra la compuerta radial, con el objetivo de simular el efecto de esta compuerta en el flujo.

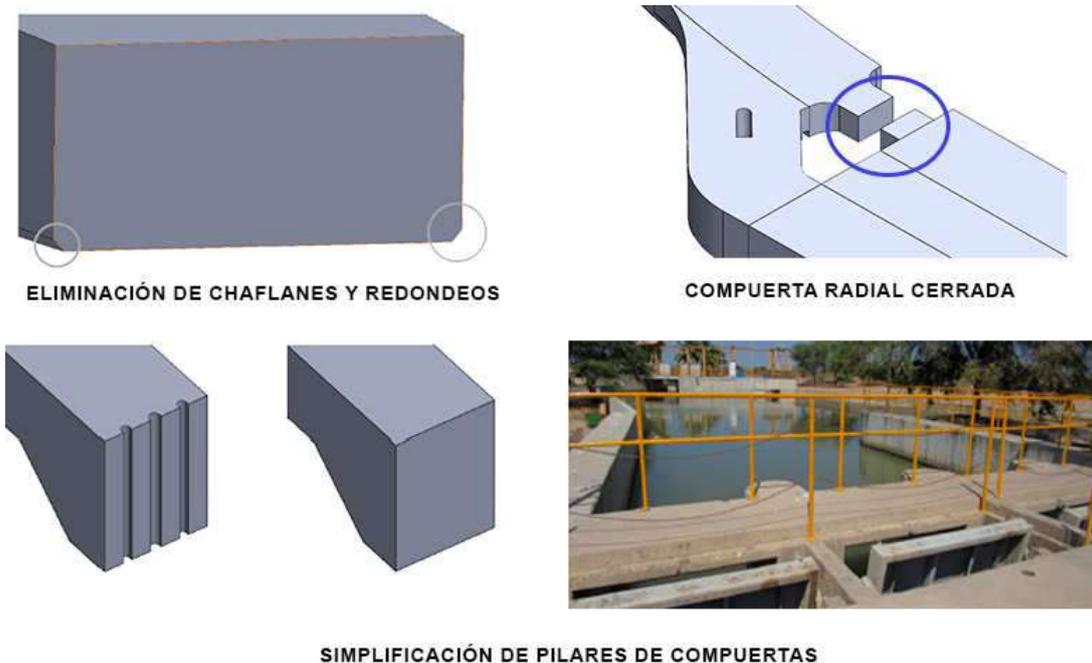


Figura 52. Simplificaciones de la geometría.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtuvo el dominio o región del espacio en el que se resuelven las ecuaciones del flujo. Después se dividió en dos partes como se muestra en la Figura 53, por las siguientes razones:

1. Se obtuvo datos experimentales del dominio 1 correspondiente a la bocatoma y cámara de carga y datos analíticos del dominio 2 correspondiente a la rápida hidráulica.
2. El costo computacional para simular la estructura total era demasiado alto.
3. Existe una gran diferencia de velocidades entre las dos partes de la estructura debido a la gran pendiente que posee la rápida hidráulica.
4. Obtener datos resultantes de las estructuras de forma independiente.
5. Dificultad presentada para alcanzar la convergencia numérica de la modelación simulando toda la estructura.

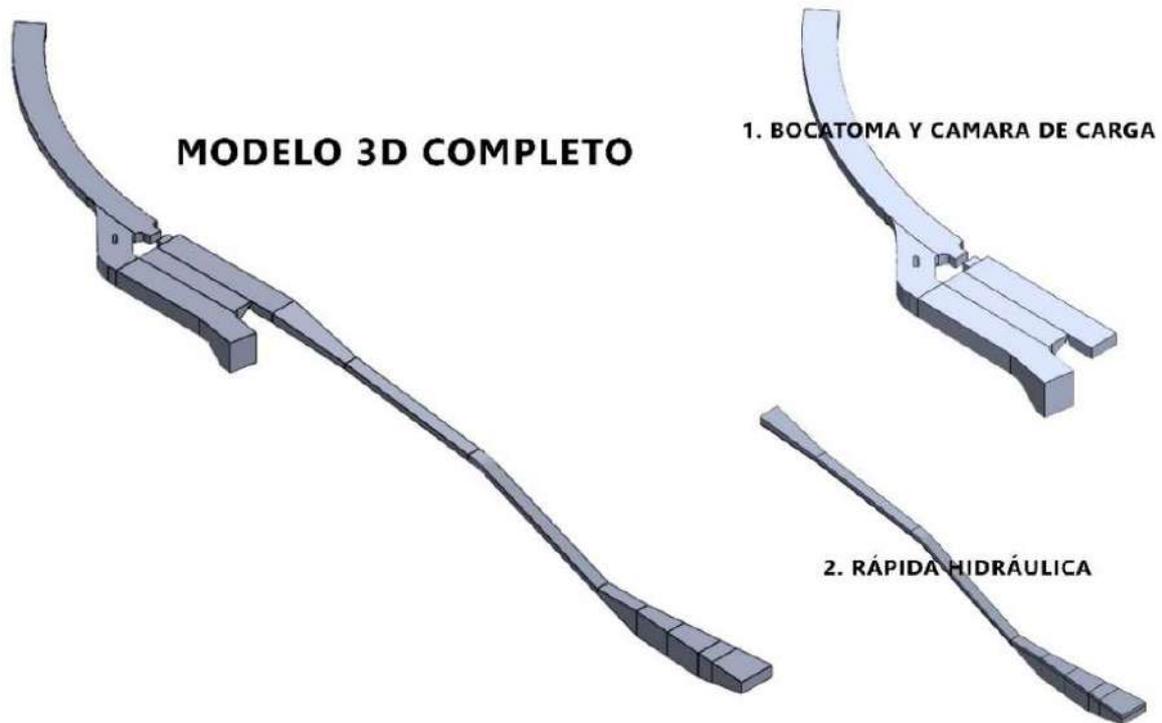


Figura 53. Dominio de la estructura estudiada.

Fuente: Elaboración propia.

El dominio se dividió en:

1. **Cámara de carga o de distribución** diseñada actuar como reserva de agua y así mantener la presión de caída en la tubería (velocidades bajas).
2. **Rápida hidráulica** encargada de conducir el agua desde una elevación mayor a una más baja hacia el cauce del río o canal de salida (velocidades altas).

Capítulo 4

Recolección de datos

4.1. Métodos de aforo

Este acápite detallará algunos de los métodos de aforo más usados para realizar una estimación de caudales superficiales correspondientes a un tirante o nivel de agua observado de un curso de agua. Principalmente, se utiliza medidores de corriente mecánicos; pero cabe resaltar que existen otros métodos para realizar la medición de flujo como el uso de medidores hidroacústicos (Perfiladores de corriente Doppler acústicos y velocímetros Doppler acústicos) (U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey, 2010).

Según el *U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey*, el flujo es la tasa volumétrica de flujo de agua (volumen por unidad de tiempo) en un canal abierto y se le denomina caudal. Este no se puede medir directamente, pero se debe calcular a partir de variables que se pueden medir, como el ancho del flujo, la profundidad del flujo y su velocidad.

4.1.1. Volumétrico

Este método conlleva el uso de: un recipiente graduado de un litro y otro con una capacidad máxima de 20 litros, tubos de 3 o 4 pulgadas de un metro de largo y un cronómetro. Como se muestra en la Figura 54, consiste en extraer cierto volumen de agua del cauce y almacenarlo en el recipiente y a la vez se debe cronometrar el tiempo de extracción del agua.

Utilizando la Ecuación 1 – 37 con los datos extraídos de la prueba se calculará el caudal superficial. Este método se recomienda para caudales menores de 5 l/s. Además, como mínimo se debe realizar cinco repeticiones o las que sean necesarias hasta que se estabilice el valor del caudal y se realizarán con un intervalo de 2 o 3 minutos. De los cinco valores se procede a descartar el máximo y mínimo, y se calculará un promedio con los tres restantes, el cuál será tomado como el caudal superficial buscado (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013).

$$Q = V / t \qquad \text{Ecuación 1 – 37}$$

Donde:

Q: caudal (l/s)

V: volumen (l)

t: tiempo (s)

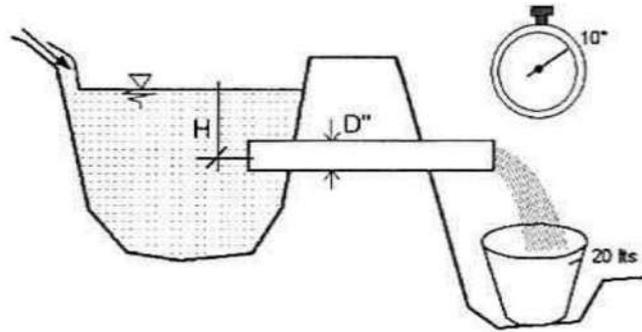


Figura 54. Aforo volumétrico.

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013.

4.1.2. Vertedero

El método consiste en medir el tirante o altura de agua (h) que pasa por el vertedero (Figura 55). Se mide la altura h a una distancia de 2 a 3 veces la carga máxima del vertedero, es decir $2H$ a $3H$. Teniendo los valores de h y L que se muestran en la Figura 55 se aplica la ecuación 1 – 38 para encontrar el valor del caudal. Es recomendable utilizarlo para caudales con un valor máximo de 30 l/s, puede usarse en secciones rectangulares, triangulares y trapezoidales. El vertedero rectangular es el más utilizado por su facilidad de construcción y cálculo sencillo (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013).

$$Q = 1,84(L - 0,2h)h^{3/2} \quad \text{Ecuación 1 – 38}$$

Donde:

Q: caudal (m^3/s)

L: largo de la cresta del vertedero (m)

h: altura o carga en el punto de referencia (m)

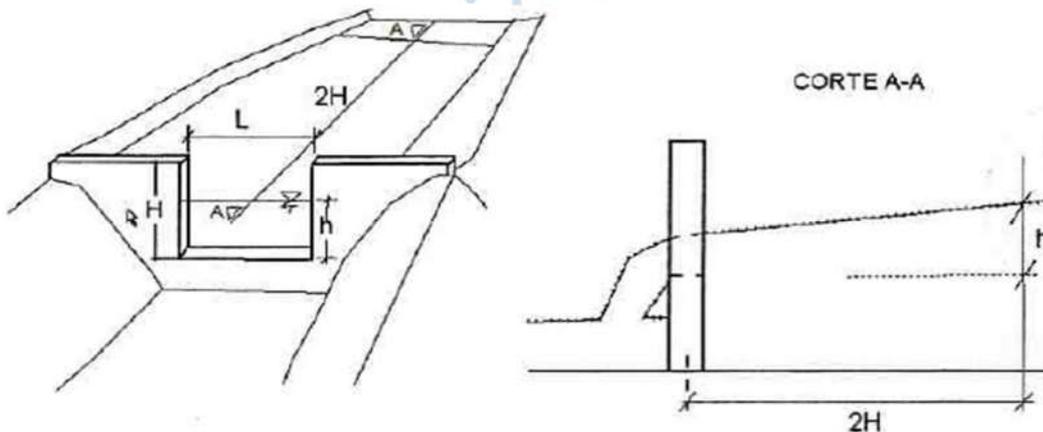


Figura 55. Aforo vertedero.

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013.

4.1.3. Flotador

Este método consiste en lanzar un flotador que pueda ser capaz de permanecer en la superficie del agua y se arrastre fácilmente. Luego, se procederá a medir el tiempo (T) que demora el flotador en recorrer la longitud proyectada (L) con el fin de conocer la velocidad de agua que lleva el agua en ese tramo. La longitud (L) debe tener entre 10 y 30 m. Este método es recomendable para grandes caudales en canales donde el agua escurre libremente en una sección transversal uniforme, es decir que presente las mismas condiciones geométricas como se muestra en la Figura 56 (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013).

$$Q = \frac{L}{T} * A * C \quad \text{Ecuación 1 - 39}$$

Donde:

Q: caudal (m³/s)

L: longitud (m)

A: área hidráulica (m²)

T: tiempo de recorrido (s)

C: factor de corrección

Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), para calcular el caudal se utiliza la Ecuación 1 - 39, considerando un valor de corrección C acorde a los detallados en la Tabla 2. Cabe resaltar que los valores de caudal obtenidos por este método son aproximados, por lo tanto, es indispensable el reajusto con el factor de corrección C.

Tabla 2. Factor de corrección de velocidad, C.

Tipo de Arroyo	Factor de Corrección de Velocidad C	Precisión
Canal rectangular con lados y lechos lisos	0.85	Buena
Río profundo y lento	0.75	Razonable
Arroyo pequeño de lecho parejo y liso	0.65	Mala
Arroyo rápido y turbulento	0.45	Muy mala
Arroyo muy poco profundo de lecho rocoso	0.25	Muy mala

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013.

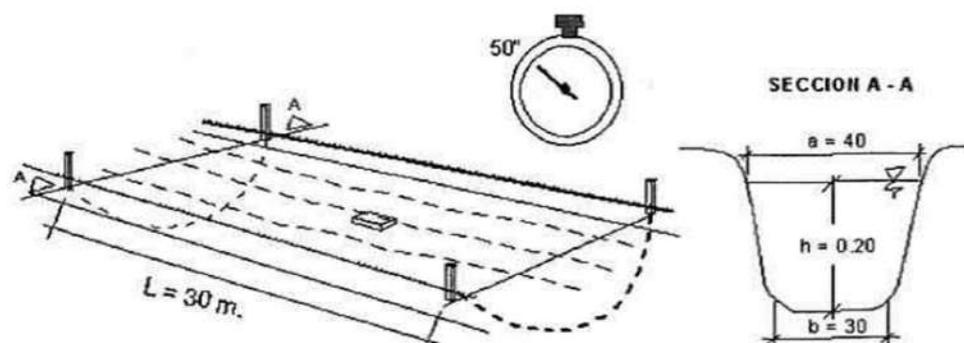


Figura 56. Aforo con flotador.

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013.

4.1.4. Correntómetro

Para este método de aforo se utiliza un correntómetro o velocímetro previamente calibrado. Se calcula la velocidad del flujo en un punto de medición utilizando la Ecuación 1 – 40, dicho valor es general dado que cada correntómetro posee su propia ecuación, que resulta de la calibración del mismo (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013).

$$V = a * n + b \quad \text{Ecuación 1 – 40}$$

Donde:

V: velocidad del agua (m/s)

n: número de vueltas de la hélice por segundo

a: paso real de la hélice (m)

b: velocidad de frotamiento (m/s)

Este método de aforo utiliza el método del área de velocidad, el mismo que consiste en realizar la medición subdividiendo una sección transversal de la corriente en segmentos (a veces denominados áreas parciales, secciones, subáreas, verticales, estaciones o perfiles), y midiendo la profundidad y la velocidad en una vertical dentro de cada segmento. Estos segmentos deben ser como mínimo de 20 cm y se debe realizar en un tramo recto, de poca pendiente y sección regular. La profundidad de aforo en cada segmento se considera acorde a lo indicado en la Tabla 3. El fondo del canal se toma como referencia inicial siendo el valor 0 de “d”, además en cada punto se debe realizar tres veces la medición (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013).

Tabla 3. Profundidades de lectura del correntómetro.

Tirante de agua (d) cm	Profundidad de lectura del correntómetro (cm)
< 15	d/2
15 < d < 45	0.6 * d
> 45	(0.2 * d y 0.8 * d) o (0.2 - 0.6 * d y 0.8 * d)

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013.

Según el *U.S. Department of the Interior* y *U.S. Geological Survey*, en la profundidad adecuada se introducirá el correntómetro o molinete y a través de un cable eléctrico por cada vuelta, el instrumento enviará un impulso eléctrico a un contador. Finalmente, al terminar el tiempo de medición, tendremos la cantidad total de vueltas en un tiempo total determinado y se utilizará esta cantidad para hallar el valor “n” presente en la Ecuación 1 – 40.

Después de obtener la velocidad del flujo en el punto de medición. Se procede a calcular el área de la sección transversal; para esto se multiplica la altura del tirante de agua (d) por el ancho de la sección parcial. En la Figura 57 se observa la división en secciones parciales de la sección transversal de un cauce. Finalmente, con el área y la velocidad del flujo se calcula el

caudal en la sección parcial; el que es determinado con Ecuación 1 – 41. El caudal total es la suma de los productos de las áreas parciales de la sección transversal de la corriente y sus respectivas velocidades promedio (U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey, 2010).

$$Q = \sum_{i=1}^n A_i V_i \quad \text{Ecuación 1 – 41}$$

Donde:

Q: caudal total (m³/s)

V: velocidad media del agua correspondiente al segmento i (m/s)

A: área de la sección transversal para el segmento i de n segmentos en que se divide la sección transversal (m²)

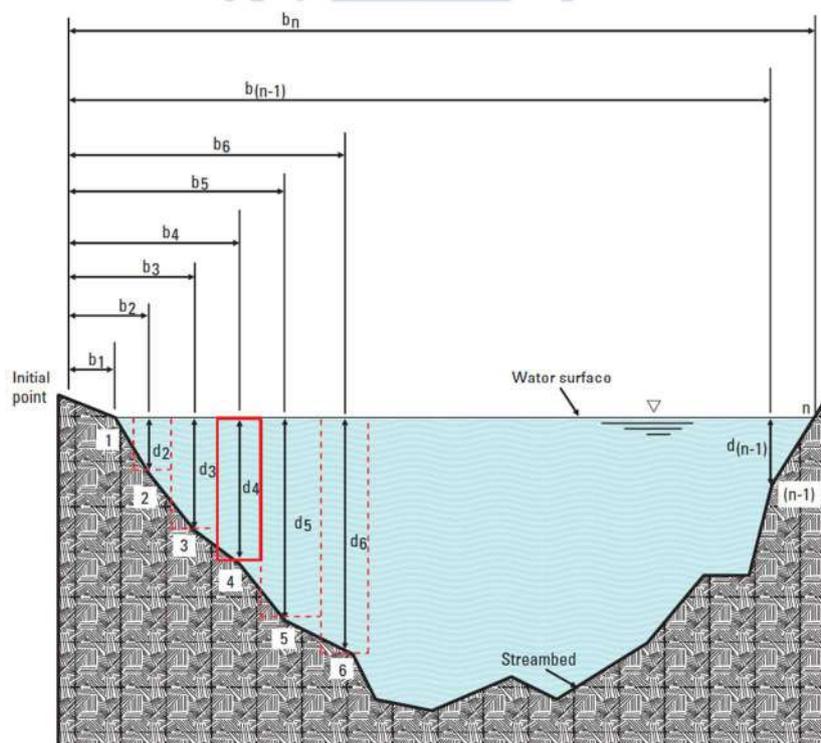


Figura 57. Secciones parciales de un cauce.

Fuente: U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey, 2010.

Para dividir la sección transversal en secciones parciales se debe tener en cuenta algunas consideraciones (U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey, 2010):

1. Se elige el número de secciones parciales de tal manera que ninguna contenga más del 10% del caudal total, se considera ideal un 5%. Se recomienda además usar entre 25 a 30 secciones y si la distribución de velocidad es uniforme se pueden utilizar menos.
2. El ancho de las secciones parciales en toda la sección transversal no debe ser el mismo a menos que la descarga se distribuya uniformemente.

3. Se recomienda disminuir el ancho de las secciones parciales a medida que las profundidades y las velocidades se vuelven mayores.

Finalmente, cuando se realiza un aforo con un equipo mecánico se debe seguir el siguiente procedimiento: medir y registrar en cada vertical (1) la distancia desde el punto inicial, (2) la profundidad, (3) la posición del medidor, (4) el número de revoluciones y (5) el intervalo de tiempo.

4.1.5. Selección del sitio

De acuerdo a lo señalado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, el primer paso para realizar una medición de corriente es seleccionar una sección transversal de medición adecuada, este paso se considera el más crítico. Si la corriente se puede vadear o la medición se puede hacer desde un bote, el hidrógrafo debe buscar una sección transversal con las siguientes características:

- Debe ubicarse en un tramo recto, con líneas de corriente paralelas y un cauce libre de grandes rocas, malezas y obstrucciones; para así evitar la presencia de remolinos y turbulencia.
- Es deseable que la sección presente una forma geometría definida. Es decir, se debe buscar una superficie de agua lisa con condiciones de flujo constantes, uniformes y no variables en el alcance de la corriente donde se tomará la medición de la descarga. Estas condiciones deben buscarse debido a que los medidores de corriente son en su mayoría calibrados en un tanque de agua con un flujo que presenta una velocidad constante y condiciones controladas.
- Las velocidades deben ser mayores que 0.15 m/s y los tirantes del flujo deben ser mayores a 0.15 m. Estas condiciones no siempre son posibles de encontrar.
- La sección transversal de medición debe estar cerca de la estación de calibración para evitar el efecto de afluentes y entradas de volumen de agua.
- La profundidad mínima cerca de los bordes izquierdo y derecho en el sitio de medición debe permitir la medición de la velocidad.
- Si se utiliza como método de aforo un Sistema de posicionamiento global con correcciones diferenciales o el Método de bucle medidores, se debe evitar secciones de medición que tengan campos magnéticos locales como las líneas eléctricas.

En la mayoría de casos no es posible satisfacer todas estas condiciones. Sin embargo, se debe seleccionar una sección transversal que cumpla con la mayoría de criterios antes mencionados.

4.1.6. Velocidad superficial

La distribución de velocidad en la sección de un canal se da debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción por el contacto del fluido con la pared. Las velocidades en la sección transversal de un canal no presentan una distribución uniforme como se muestra en la Figura 58 para diferentes secciones de canales hidráulicos. Las velocidades máximas suelen presentarse en la parte central de la sección transversal a una distancia entre 0.05 y 0.25 m de la superficie libre del mismo (Chow, 1994).

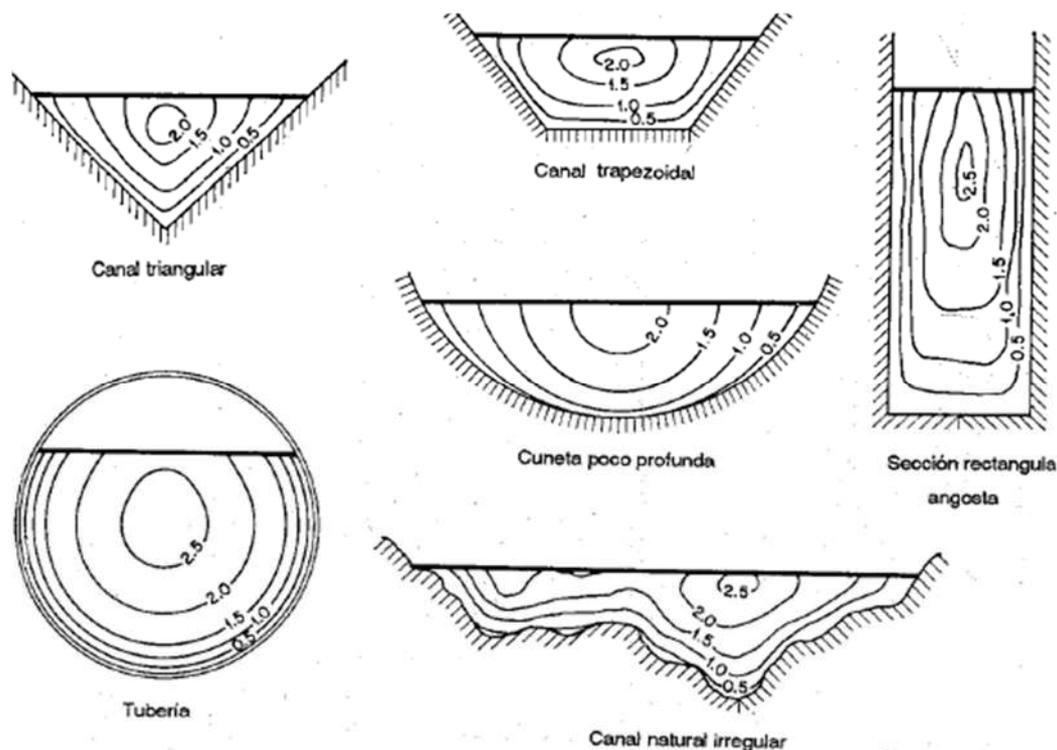


Figura 58. Distribución de velocidad para diferentes secciones transversales.

Fuente: Chow, 1994.

Otros factores como la forma inusual de la sección, la rugosidad del canal y las curvas en la trayectoria del mismo influyen en la distribución de velocidades. Según Chow, la rugosidad del canal causa un incremento en la curvatura de la curva de distribución vertical de velocidades, presentando una forma aproximadamente logarítmica como la Figura 59.

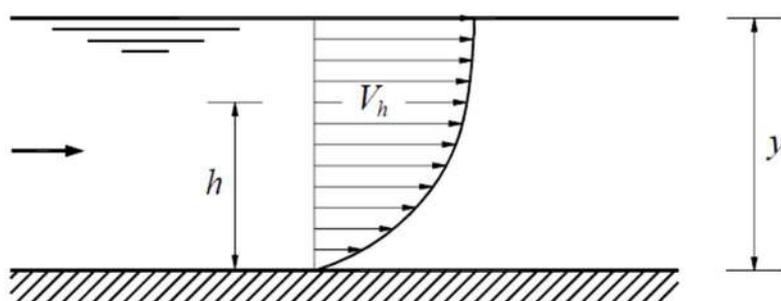


Figura 59. Perfil de velocidad en un canal abierto.

Fuente: Rocha, Hidraulica de Canales, 2007.

Se considera velocidad superficial a la presentada en un cauce al 0% de profundidad, el método de aforo con flotadores nos arroja esta velocidad. La velocidad media de la corriente, se considera entre $(0.75 - 0.90) \cdot V_{\text{superficial}}$, donde el límite mayor se aplica a las corrientes de agua más profundas y rápida. Para estimar la velocidad media se suele utilizar la Ecuación 1 – 42 (Mejía Rodríguez & Rosas Ayala, 2016).

$$V_m = 0.85 \cdot V_s \quad \text{Ecuación 1 – 42}$$

Donde:

V_m : velocidad media (m/s)

V_s : velocidad superficial (m/s)

4.2. Aforos realizados

En este acápite se describirá el procedimiento y las consideraciones que se tomaron para realizar los aforos, con el objetivo de obtener los datos necesarios para validar el modelo numérico. Además, se detallarán también las dificultades que se presentaron dado que puede ser un factor que aumente la desviación de los resultados del modelo respecto a los ensayos. Se realizaron en total tres aforos como se muestra en Figura 60, de los cuales dos dentro de las instalaciones de la central hidroeléctrica de Curumuy y uno aguas arriba del canal de derivación Daniel Escobar.



Figura 60. Ubicación de aforos realizados.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1. Equipo

Los aforos se realizaron utilizando un correntómetro mecánico, el cual fue facilitado por el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura. Los accesorios del equipo utilizado son los siguientes (OTT MESSTECHNIK GmbH, 2006):

- **Contador OTT Z400:** registra las revoluciones del molinete y el tiempo; el contador inicia cuando se conecta al molinete y este se encuentra girando. Se puede configurar especificando un intervalo de tiempo total o un número total de impulsos (Figura 61).
- **Molinete universal OTT C31:** este tipo de molinete permite realizar mediciones con velocidades comprendidas entre un intervalo de 0,025 m/s y 10 m/s; en función del tipo de hélice. Puede usarse en arroyos, ríos y canales; como molinete de barra o flotante. Se estima que posee un error de medición de tiempo $\pm 0,01$ s y de impulso de $\pm 0,5$ impulsos.



Figura 61. Contador y molinete universal OTT C31.

Fuente: OTT MESSTECHNIK GmbH, 2006.

Como se mencionó anteriormente, cada molinete tiene su propia ecuación. El que se utilizó para los aforos presenta la Ecuación 1 – 43.

$$V = 0.2575 * n + 0.005 \quad \text{Ecuación 1 – 43}$$

Donde:

V: velocidad del agua (m/s)

n: número de vueltas de la hélice por segundo

4.2.2. Limitaciones presentadas

A lo largo del desarrollo de los ensayos para encontrar el caudal y velocidades correspondientes para validar la modelación numérica se presentaron un conjunto de limitaciones las cuales se detallan a continuación:

1. Debido a que la central hidroeléctrica almacena el agua en la cámara de carga hasta aproximadamente las 6:00 p.m.; solo se pudo realizar los aforos a partir de este horario. Esta condición limitó el tiempo en que se podía aforar, lo que pudo influir en la exactitud de las mediciones y la cantidad de puntos de medición tomados.

2. El primer aforo se realizó desde un puente, ubicado muy cerca de la central Hidroeléctrica. Este puente no presentaba barandas metálicas que puedan servir de apoyo para realizar un aforo con molinete suspendido utilizando un cabrestante, por este factor que representaba un riesgo de seguridad y la constante afluencia vehicular (Figura 62); se realizó el aforo con molinete de barra, registrando solo las revoluciones a una profundidad aproximada de 10 cm de distancia de la superficie libre.



Figura 62. Fluencia vehicular en primer aforo.

Fuente: Elaboración propia.

3. El segundo aforo se realizó en la bocatoma. Debido a la presencia de una baranda metálica poco consistente que garantiza la seguridad del aforador y del equipo, no se realizó un aforo con molinete suspendido sino con barra registrando las revoluciones en puntos superficiales como se muestra en Figura 63. Cabe resaltar que en esta zona al tener la bocatoma una geometría curva (Figura 64) y estar presente la compuerta radial; se presentó recirculación de flujo. Por esta razón no se calculó un caudal de entrada sino se midieron las velocidades en coordenadas absolutas respecto al origen del modelo en 3D.



Figura 63. Segundo aforo.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 64. Recirculación de flujo.

Fuente: Elaboración propia.

4. Se requirió también obtener las velocidades presentes en la entrada de la rápida o transición de la misma. Para la realización de este aforo no se encontró ninguna estructura construida de concreto armado o metálica, que sirva de apoyo para realizar el aforo con molinete suspendido o con barra. Además, la turbulencia y las velocidades del flujo son elevadas; produciéndose aireación en el mismo. Por estas razones y siendo imposible utilizar otro método de aforo, se realizó la medición de velocidades superficiales utilizando el método del flotador que se detalla en la sección 4.1.3. Este método no afecta los resultados del modelo dado que solo será utilizado como un dato comparativo.

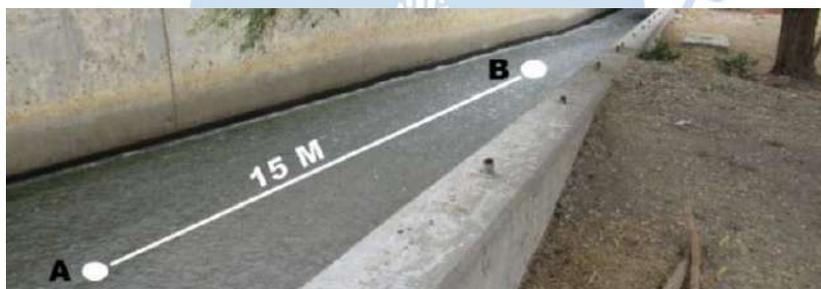


Figura 65. Tercer aforo. Método del flotador.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Primer aforo

Se realizó con el objetivo de obtener el caudal de entrada para ser ingresado en las condiciones de frontera. Se aforó aguas arriba de la central debido a que cerca de la zona no existía ninguna estructura que sirva como soporte para realizar el aforo (Figura 60). Se verificó que no exista una pérdida de caudal entre este primer punto de medición y el inicio de la zona de estudio, así se aseguró que el caudal medido sea el correcto. Además, debido a que el aforo no se podía realizar en otra ubicación y dada la curvatura del canal, se utilizó más de 20 puntos de medición para mejorar su precisión.

De las condiciones que se detallan en el acápite 4.1.5 para elegir correctamente el sitio de aforo; se tuvo en cuenta que se cumplan la mayoría en la medida de lo posible. Además, se

midio las velocidades superficiales realizando un aforo con varilla como se muestra en la Figura 62 y se siguió el procedimiento detallado en el acápite 4.1.4, dividiendo la sección transversal en once secciones parciales (Figura 66). Los parámetros hidráulicos correspondientes a la sección transversal estudiada según Villón (2007) se detallan en Tabla 4.

Tabla 4. Elementos geométricos y parámetros hidráulicos.

Elementos geométricos y parámetros hidráulicos			
Tirante de agua	y	2.38	m
Ancho de solera	b	5.00	m
Espejo de agua	T	12.14	m
Profundidad total del canal	H	3.65	m
Ángulo de inclinación de las paredes laterales	Θ	33.69	$^{\circ}$ C
Talud	Z	1.5	
Área hidráulica	A	20.40	m ²
Radio hidráulico	R	1.50	m
Perímetro mojado	p	13.58	m

Fuente: Elaboración propia.

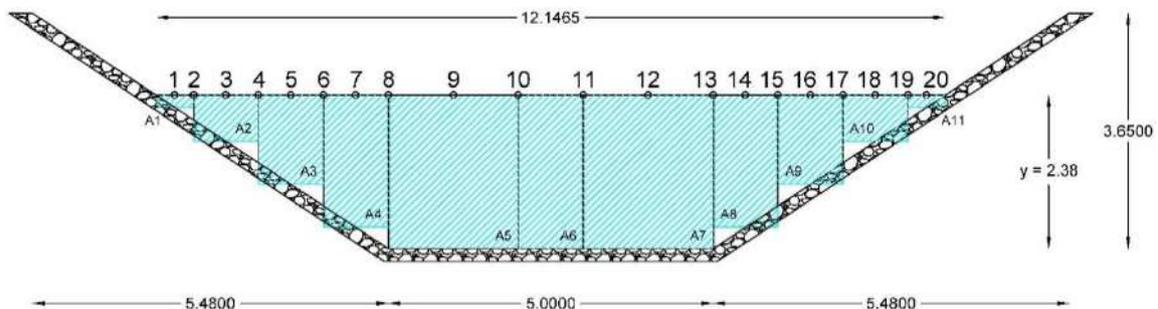


Figura 66. Secciones parciales de primer aforo.

Fuente: Elaboración propia.

A través del método del correntómetro se encuentran las revoluciones que produce el instrumento en cada una de las secciones parciales para luego hallar el caudal total. Se registraron datos en 20 puntos a lo largo de la sección transversal (Figura 66) para finalmente obtener un caudal de 23,479 m³/s según se detalla en el Anexo B. Además, se presenta un resumen de las revoluciones registradas y los caudales de las secciones parciales en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen datos primer aforo.

	Sección	Vel prom	Área hidráulica	Q prom
TALUD	A1	0.631	0.108	0.068
	A2	1.071	0.713	0.764
	A3	1.14	1.38	1.573
	A4	1.135	2.047	2.323
CAJA	A5	1.282	4.76	6.101
	A6	1.356	2.38	3.228
	A7	1.174	4.76	5.586
TALUD	A8	0.944	2.047	1.933
	A9	0.908	1.38	1.253
	A10	0.839	0.713	0.598
	A11	0.469	0.108	0.051
	Total		20.396	23.478

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Segundo aforo

El segundo y tercer aforo se realizaron dentro de las instalaciones de la central Hidroeléctrica de Curumuy en la ubicación que se muestra en la Figura 67. Para su realización se presentaron ciertas dificultades detalladas en el acápite 4.2.2, por esto se considerará el valor de la velocidad en coordenadas absolutas en función del sistema de referencia del modelo en 3 dimensiones, dichas velocidades se especifican en la Tabla 6. El uso de coordenadas se utilizará para ubicar el parámetro hidráulico en el modelo, con fines comparativos; ya que no se puede aplicar el método del correntómetro por la recirculación que se presenta.



Figura 67. Aforos dentro de la central de Curumuy.

Fuente: Google Earth, 2019.

Tabla 6. Segundo aforo. Velocidades en coordenadas absolutas.

Pto	Coordenadas absolutas			Rev (50s)	Velocidad (m/s)	Tirante (m)
	x	y	z			
1	132.5374	3.0394	182.8442	212	1.097	2.75
2	133.2406	3.0678	182.1331	220	1.138	2.75
3	133.9437	3.0585	181.4221	207	1.071	2.75
4	136.9431	3.0573	178.3890	155	0.803	2.75

Fuente: Elaboración propia.

4.2.5. Tercer aforo

Se realizó este aforo en la entrada de la rápida hidráulica utilizando el método de flotadores dado que era el único posible debido a la inexistencia de una estructura de apoyo y a la presencia de aireación en el flujo por las velocidades altas. Además, el uso del método del correntómetro hubiese sido impreciso por la aeración que se presentaba. El aforo se realizó en la ubicación que se especifica en la Figura 67 y se siguió el procedimiento detallado anteriormente en el acápite 4.1.3.

El método de flotadores es de medición directa y algunos investigadores consideran que no es impreciso. Además, para su aplicación se tomó en cuenta todas las recomendaciones que detalla la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en su guía metodológica de inspecciones oculares.

Para la aplicación del método se consideró una longitud de 15 m y se utilizó como objeto botellas plásticas llenas de agua, debido a que se necesitaba que las botellas tengan algo de peso ya que las líneas de corriente presentaban cierta turbulencia; si se hubiese utilizado botellas vacías probablemente no se siguiera una trayectoria rectilínea (Figura 65). Los datos registrados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos método del flotador.

Pto	Tiempo (min)	Distancia (m)	Velocidad Superficial (m/s)
1	4.04	15.00	3.71
2	3.40	15.00	4.41
3	2.60	15.00	5.77
4	3.40	15.00	4.41
5	3.20	15.00	4.69
V sup prom			4.60

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Ecuación 1 – 39 podemos deducir que la velocidad superficial hallada debe ser corregida considerando el factor C. Utilizando la Ecuación 1 – 44 y considerando un factor de corrección “C” igual a 0.85 dado que es un canal rectangular con lados y lechos lisos; se corregirá el valor de velocidad encontrado.

$$V = V_{sup} * C \quad \text{Ecuación 1 – 44}$$

$$V = 4.60 * 0.85$$

$$V = 3.9083 \text{ m/s}$$

El tirante encontrado en este aforo es de 0.36 m.

Capítulo 5

Simulación numérica del proyecto

5.1. Metodología utilizada

Partiendo de lo detallado en los capítulos anteriores, se llevará a cabo la simulación numérica tridimensional de las estructuras estudiadas, cámara de carga y rápida hidráulica. Se busca obtener la representación del flujo, a través de la modelación de imágenes con líneas de flujo, perfiles de velocidades y principalmente una comparación con los valores de velocidades y tirantes obtenidos con la realización de los ensayos.

En el capítulo se irá desarrollando cada una de las etapas de modelación detalladas en el acápite 2.2.1; desde la modelación de la geometría y generación de malla hasta el cálculo de la solución. Además, se irá detallando los criterios aplicados para la elección de los valores configurados en la modelación.

Cabe resaltar previamente que se simuló dos estructuras, las que se denotan en la Figura 53. El procedimiento que se siguió se detalla a continuación:

a) Definir los objetivos de la modelación

- Bocatoma y cámara de carga: Se modeló con el objetivo de obtener el caudal de entrada a la rápida hidráulica, debido a que en la entrada a la rápida no existe una estructura de apoyo desde la que se pueda realizar el aforo para obtenerlo. Además, para entender el comportamiento hidráulico de los vertederos, la cámara de carga y la bocatoma presente en esta parte del proyecto.
- Rápida hidráulica: Se modeló con la finalidad de realizar una comparación entre los datos calculados y los que se obtuvieron del modelo numérico. De esta manera se busca validar una configuración adecuada para simular este tipo de estructura en el software.

b) **Identificar el dominio:** Tomando como referencia los planos proporcionados, se identificó el dominio de interés para posteriormente realizar el modelo en tres dimensiones. Una de las partes del dominio que no se consideró fue el primer tramo del canal de derivación Daniel Escobar debido a que estaba fuera del área de interés.

- c) **Crear un modelo sólido:** En el capítulo 3, se explicó el procedimiento para la realización del modelo en 3D de la estructura hidráulica estudiada en el software SolidWorks. Al finalizar se obtuvo dos modelos sólidos; el primero correspondiente a la bocatoma y cámara de carga y el segundo a la rápida hidráulica, los mismos se procederán a importar en el módulo de geometría del software ANSYS CFX.

A continuación, se definirá las configuraciones realizadas en las siguientes etapas de la modelación para cada uno de los dominios definidos anteriormente.

5.2. Bocatoma y cámara de carga

En esta sección se describirá la modelación realizada para la bocatoma y cámara de carga de la hidroeléctrica, para la calibración de estos modelos se ha tomado como referencia las investigaciones de Monge (2017), Jaramillo (2017) y Arteaga (2017). El dominio usado en la modelación es el número uno de la Figura 53 y su geometría se realizó en el software SolidWorks.

El primer paso consiste en crear un sistema de análisis en la ventana de ANSYS *Workbench*, herramienta del paquete computacional que cumple la función de gestionar los archivos generados en la modelación y verificar la condición de las diferentes etapas del análisis. Esto lo logra siendo la interfaz que une todas las herramientas del paquete computacional. Como se muestra en la Figura 68, al iniciar un análisis se crea una ventana que funciona como un enlace a la *geometry, mesh, setup, solution y results*.

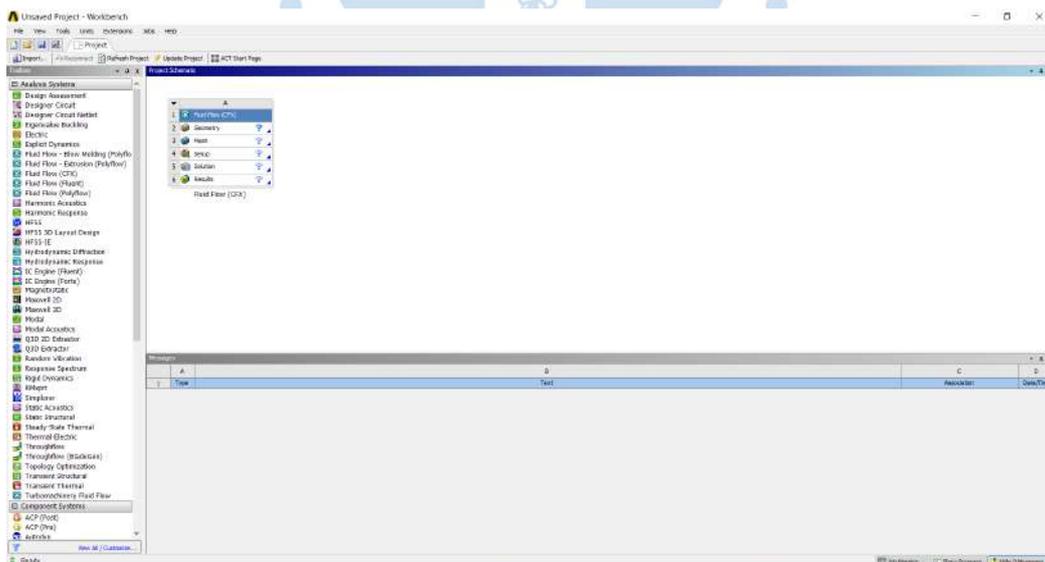


Figura 68. Interfaz *Workbench*.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describirá las configuraciones finales resultantes del proceso iterativo realizado para encontrar la configuración correcta para la estructura estudiada. Primero, se

procedió a importar la geometría desde SolidWorks al módulo *Design Modeler*, el cual es uno de los programas utilizados para crear y modificar geometrías en el paquete computacional ANSYS. Para la importación se utilizó el formato de archivo de Parasolid *.x_t*, el cual contiene la geometría en archivos de texto o binarios. Existen además otros formatos compatibles, como el formato de archivo de Parasolid *.x_b* y el formato IGES. La geometría importada se muestra en la Figura 69.

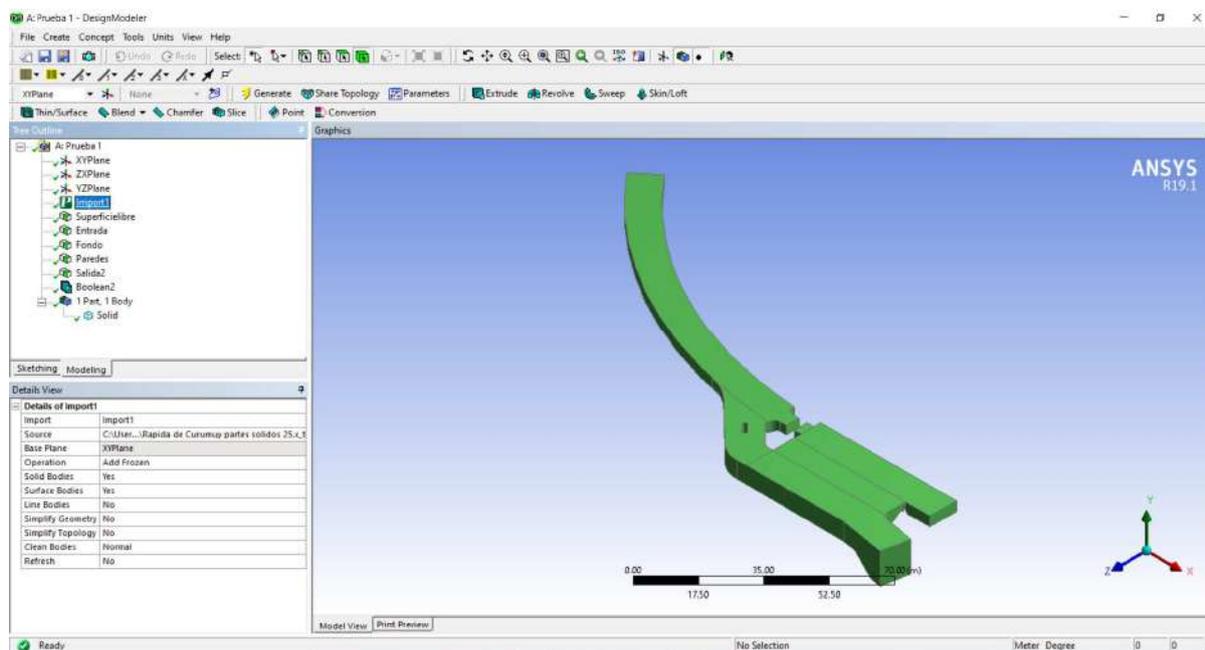
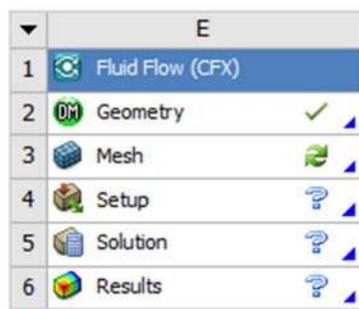


Figura 69. Geometría de bocatomía y cámara de carga importada a *DESIGN MODELER*.

Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar la importación de la geometría al complemento *Design Modeler* es necesario verificar que en la ventana de *Workbench* se marque la geometría con un *check*. Esto indica que no existe ningún error y se puede proseguir a la configuración del mallado (Figura 70). Después de la realización del mallado, se definió también la geometría donde se colocaría las condiciones de contorno o de frontera; para esto se usó la herramienta “*Named Selection*” del *Design Modeler* (Figura 71).



Bocatomía y cámara de carga

Figura 70. Verificación de geometría.

Fuente: Elaboración propia.

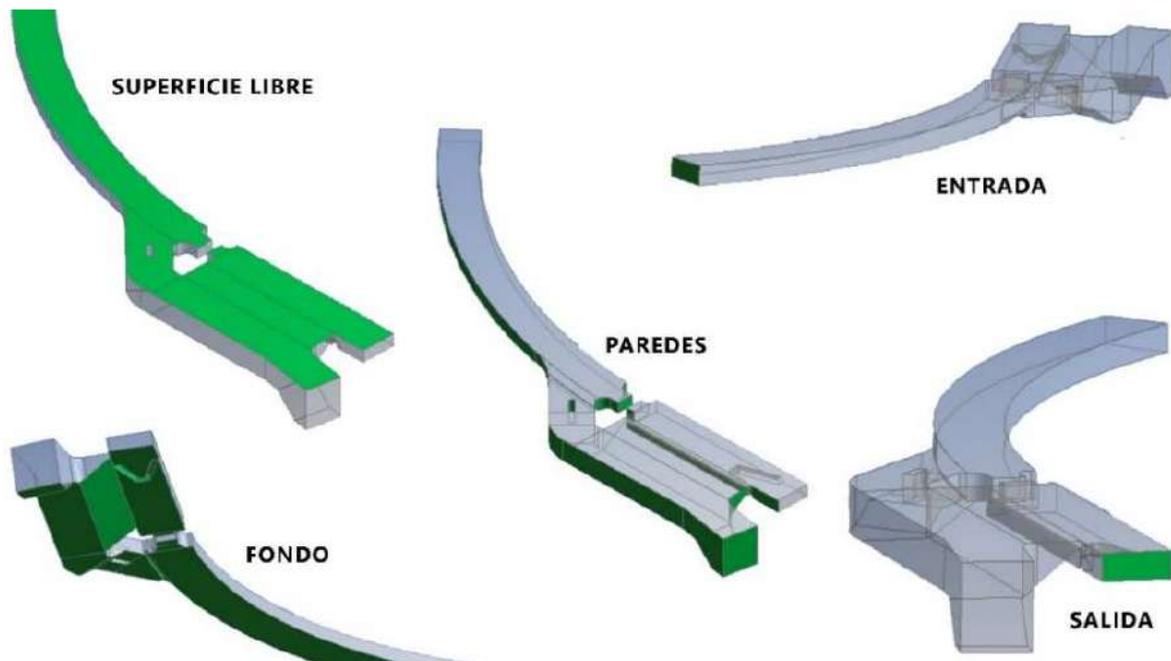


Figura 71. Condiciones de frontera definidas en Bocatoma y cámara de carga.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1. Diseñar y crear la malla

En esta etapa, se configuro el mallado del dominio del fluido; siguiendo ciertas características que permitieron optimizar el análisis y procesamiento de datos. El mallado se realizó en el programa del paquete computacional llamado *Meshing*, al cual se importó la geometría desde el *Design modeler*. Para realizar un mallado es necesario tener en cuenta el dimensionamiento, los parámetros de calidad, el método usado y el refinamiento de la malla; así obtendremos una mayor precisión en los resultados.

Para introducir la configuración del mallado, es necesario abrir el complemento *Meshing* desde la ventana de inicio del *Workbench* desplegando las opciones de elaboración de la malla y clic en editar (Figura 72).

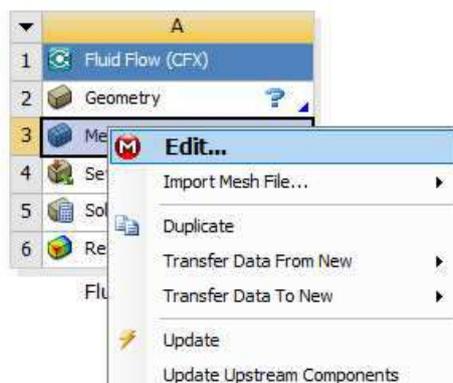


Figura 72. Opciones de mallado.

Fuente: Elaboración propia.

Para este estudio se realizó dos tipos de análisis, uno transitorio y otro estacionario; más adelante se explicará las consideraciones para cada uno. Con respecto al mallado se verifico que se cumpla con los parámetros de calidad de la sección 2.2.3.2 y se simulo con las siguientes mallas.

5.2.1.1. Análisis transitorio

Se realizó a partir de un solo dominio, sin crear un subdominio para su posterior refinamiento. Corresponde a un mallado no estructurado, ya que se usa solo elementos tetraédricos por la geometría compleja que presenta. Se configuro con 3 métodos de mallado y dos refinamientos como lo muestra la Figura 73.

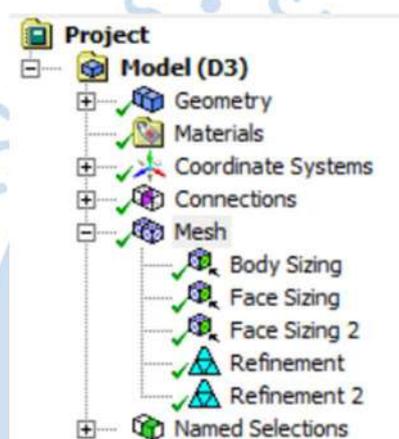


Figura 73. Configuración primer mallado.

Fuente: Elaboración propia.

- *Body Sizing*: esta herramienta ayuda a limitar el tamaño de los elementos de la malla o volúmenes de control, se seleccionó todo el dominio para su aplicación y se configuro un tamaño de elemento de 0.4 m (Figura 74). En opciones avanzadas se precisó un comportamiento duro o *hard*, lo que fuerza al complemento de mallado a usar como máximo el tamaño de elemento precisado (ANSYS. INC, Meshing User's Guide, 2017).

Details of "Body Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0.4 m
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (1.4116e-002 m)
Behavior	Hard
Capture Curvature	No

Figura 74. *Body Sizing*.

Fuente: Elaboración propia.

- *Face Sizing*: se aplicó dos veces esta herramienta a algunas caras que presentaban curvatura, ubicadas en la toma de agua o bocatoma (Figura 75). Al usar esta opción en el mallado se refina los volúmenes de control cercanos a estas caras o superficies. Se optó por su uso, debido a que se necesitaba mayor precisión en los resultados por el aforo que se realizó en esta zona y la presencia de pilares de concreto que influyen al flujo. Como se detalla en Figura 75 se utilizó un tamaño de elemento de 0.2 m y un comportamiento *hard* (ANSYS. INC, Meshing User's Guide, 2017).

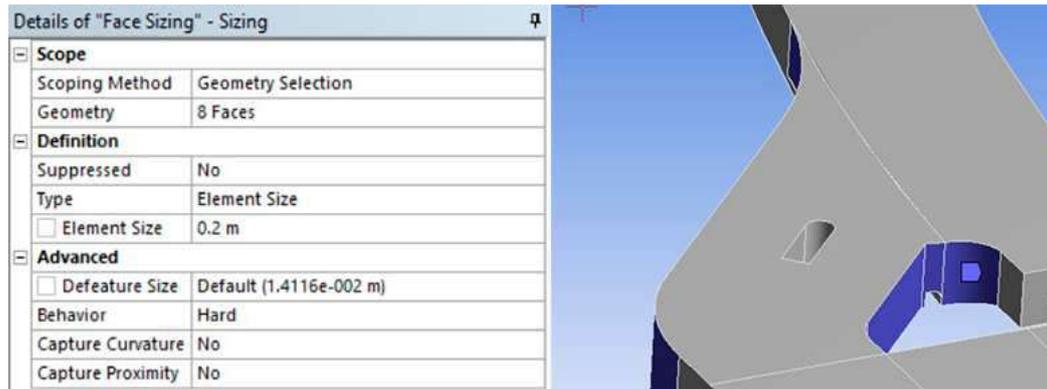


Figura 75. *Face Sizing*.

Fuente: Elaboración propia.

- *Refinement*: se utiliza esta opción de mallado para refinar los volúmenes de control cercanos a ciertas caras (vertederos), a diferencia del *face sizing* no se puede colocar un tamaño de elemento específico sino una escala y a partir de esta el software refina los elementos. Se utilizó un refinamiento de 1, lo que hace que los elementos se reduzcan a la mitad de su tamaño respecto a los anteriores métodos de mallado colocados, para lograrlo se configuró la modelación según la Figura 76 (ANSYS. INC, Meshing User's Guide, 2017).

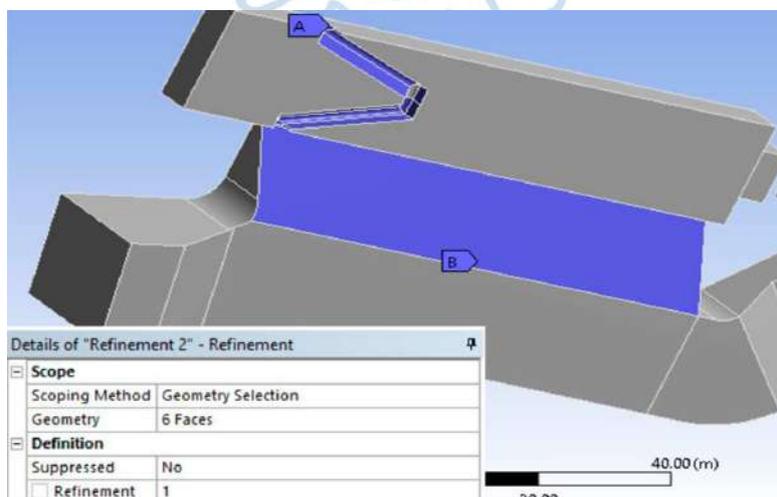


Figura 76. *Refinement*.

Fuente: Elaboración propia.

Las simulaciones de superficie libre son muy sensibles a condiciones de frontera y ajustes iniciales incorrectos, por lo tanto, es necesario verificar algunos parámetros de calidad de malla, como los descritos en el acápite 2.2.3.2. Para hallar estos parámetros es necesario ingresar a los detalles generales de mallado ubicados en la ventana inferior izquierda del complemento *meshing* al seleccionar *mesh*. Después desplegamos las opciones de *quality* y en la opción *mesh metric* seleccionamos el parámetro de calidad que deseamos evaluar (Figura 77).

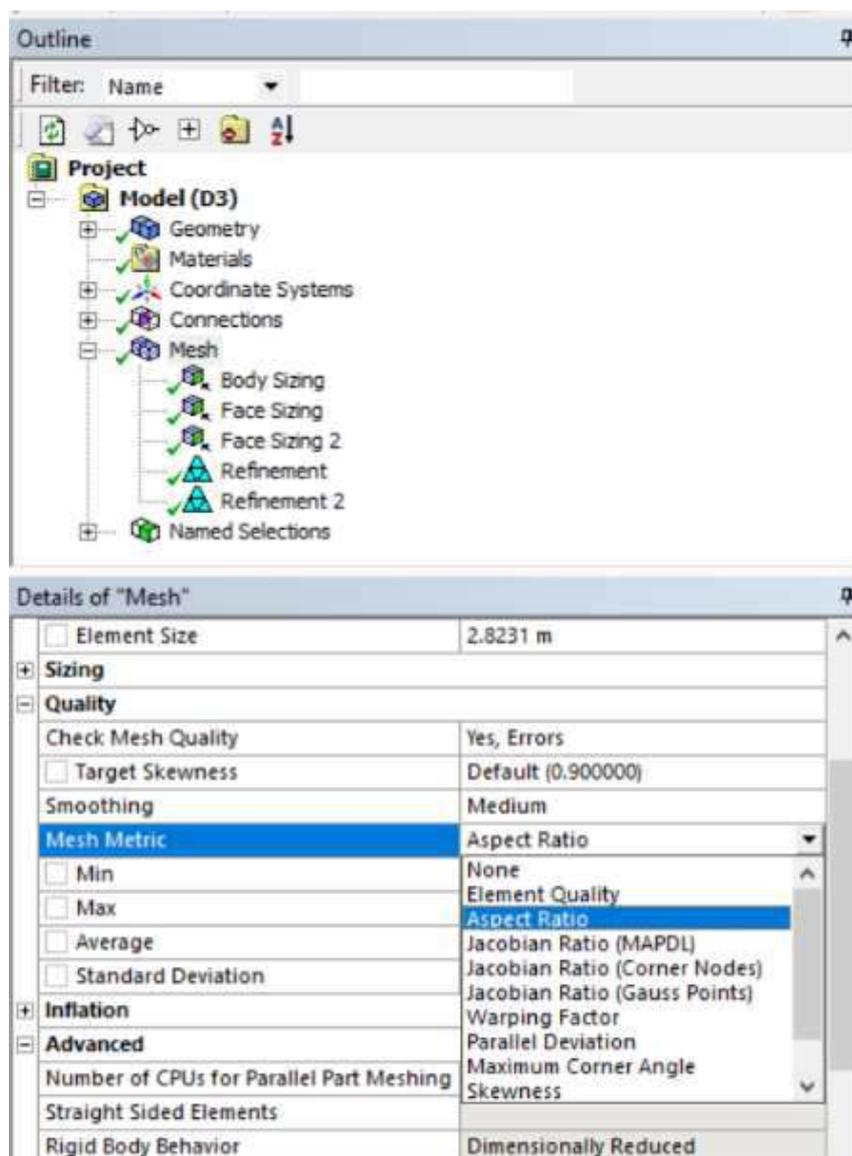


Figura 77. Selección de parámetros de calidad de malla.

Fuente: Elaboración propia.

- **Calidad del elemento (*Element Quality*):** representa la semejanza de los elementos respecto a un cubo perfecto, debe tener un valor cercano a 1. Para este mallado obtuvimos una calidad del elemento promedio de 0.83807 (Figura 78), se considera buena por ser cercana a 1. Además, los mallados no estructurados no tienen una calidad del elemento muy alta debido a la forma de los elementos.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.10787
<input type="checkbox"/> Max	0.99982
<input type="checkbox"/> Average	0.83807
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	9.9806e-002

Figura 78. Características de calidad de elementos - mallado 1.

Fuente: Elaboración propia.

- **Aspecto del elemento (*Aspect ratio*)**: mide el alargamiento de la celda y se calcula como se detalla en el acápite 2.2.3.2. Es recomendable que tenga un valor menor a 3. Nuestra malla presenta una relación de aspecto promedio de 1.8416 cumpliendo así con el parámetro al no presentar elementos demasiado alargados (Figura 79).

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Aspect Ratio
<input type="checkbox"/> Min	1.1698
<input type="checkbox"/> Max	17.578
<input type="checkbox"/> Average	1.8416
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.46046

Figura 79. Características de aspecto del elemento - mallado 1.

Fuente: Elaboración propia.

- **Oblicuidad (*Skewness*)**: este parámetro representa la similitud de los elementos respecto a una celda equilátera de volumen equivalente. Con un valor de oblicuidad promedio de 0.22727, nuestra malla presenta una calidad de celda excelente (Figura 80).

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	3.1569e-004
<input type="checkbox"/> Max	0.98479
<input type="checkbox"/> Average	0.22727
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.13318

Figura 80. Características de oblicuidad - mallado 1.

Fuente: Elaboración propia.

- **Ortogonalidad (*Orthogonal quality*)**: los valores de este parámetro varían de 0 a 1. Para este mallado se obtuvo una ortogonalidad de los elementos promedio de 0.77146 (Figura

81), cuyo valor es cercano a 1 por lo que se considera que el mallado posee una buena ortogonalidad.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	1.5205e-002
Max	0.99574
Average	0.77146
Standard Deviation	0.13171

Figura 81. Características de ortogonalidad - mallado 1.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 82 muestra el mallado resultante con refinamiento en ciertas caras del modelo y en los vertederos pertenecientes a la estructura; se observa además que se obtuvo una densidad de malla alta.

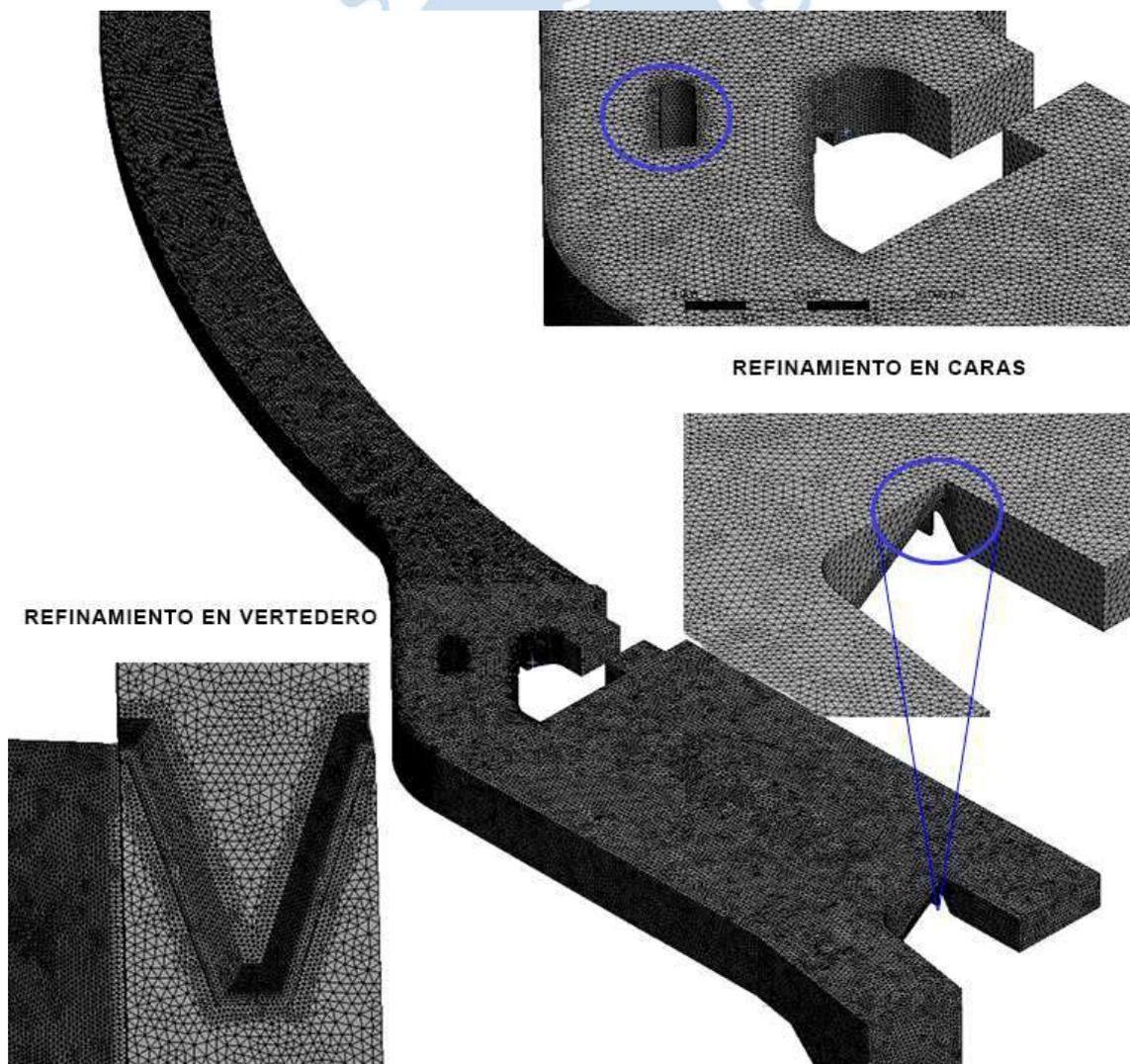


Figura 82. Primer mallado.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo un mallado con parámetros de calidad muy buenos, cabe resaltar que se llegó a este mallado después de realizar varias pruebas con diferentes tipos y refinamientos de malla, obteniendo los mejores resultados con los dos mallados que se describirán en la presente sección. La Tabla 8 detalla un resumen de los datos del mallado 1.

Tabla 8. Resumen datos mallado 1.

Indicador		Cantidad	
Nodos		371652	
Elementos		1983461	
Tetraedros		1983461	
Métodos de mallado			
Método	Tamaño		Cantidad
<i>Body sizing</i>	0.4	m	1
<i>Face sizing</i>	0.2	m	2
<i>Refinement</i>	1	esc	2
Parámetros de calidad de malla			
Parámetro	Min	Prom.	Max
Calidad del elemento	0.1079	0.8381	0.9998
Aspecto del elemento	1.1698	1.8416	17.5780
Oblicuidad	0.0003	0.2273	0.9848
Ortogonalidad	0.0152	0.7715	0.9957

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.2. Análisis estacionario

Esta modelación corresponde a un análisis estacionario cuya configuración será explicada posteriormente y lo que implica este tipo de análisis se detalla en el acápite 2.2.8. También se realizó a partir de un solo dominio y se creó inicialmente una configuración de malla homogénea para las dos fases (Figura 83); para luego utilizar la herramienta de adaptación de malla o *mesh adaption*. Esta herramienta solo puede ser usada para análisis estacionarios y se configura dentro del *SETUP*. La adaptación de malla refina el mallado donde el gradiente de fracción de volumen es mayor y la malla refinada ayuda en el desarrollo de una interfaz nítida entre las fases (ANSYS. INC, CFX-Pre User's Guide, 2016).

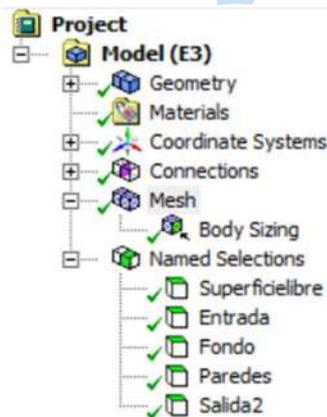


Figura 83. Configuración de segundo mallado.

Fuente: Elaboración propia.

En el segundo mallado se aplicó solo el método de *body sizing* con un tamaño de elementos de 0.5 m para obtener un mallado homogéneo que posteriormente será automáticamente refinado por el programa en la superficie libre con la herramienta *mesh adaption* (Figura 83).

Tabla 9. Resumen datos de mallado 2.

Indicador		Cantidad		
Nodos		155434		
Elementos		824768		
Tetraedros		824768		
Métodos de mallado				
Método		Tamaño		Cantidad
<i>Body sizing</i>		0.5	m	1
Parámetros de calidad de malla				
Parámetro		Min	Prom	Max
Calidad del elemento		0.024	0.8444	0.9999
Aspecto del elemento		1.1624	1.8231	77.766
Oblicuidad		0.0002	0.2162	0.9978
Ortogonalidad		0.1136	0.7826	0.9959

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 9, a pesar de ser un mallado homogéneo con un solo método, se obtuvieron buenos valores para los parámetros de calidad de esta malla. Por todo esto se considera que es un mallado correcto, cabe resaltar que se eligió esta configuración después de iterar varias alternativas usando la herramienta *mesh adaption*.

5.2.2. Definición de la física del modelo

El siguiente paso en la modelación es la definición de la física, lo cual se realiza en el módulo *Setup* del paquete computacional. Aquí, se especifica también las propiedades de los fluidos y las condiciones de frontera para el dominio estudiado.

El primer paso para configurar una modelación es ingresar al módulo *Setup* desde la ventana de trabajo del *Workbench*, para esto da un clic derecho para desplegar las opciones y se selecciona la opción *Edit*. Después se abrirá la interfaz del módulo *Setup*, mostrada en la Figura 84.

En la ventana del *Setup* se distinguen tres zonas: al lado derecho esta la zona de trabajo donde se presenta el modelo en tres dimensiones y se proyectan las configuraciones que se irán ingresando, en la parte izquierda se encuentran los accesos directos a las ventanas en las cuales se ingresarán las configuraciones respectivas y en la parte superior las herramientas. Además, en el grupo de herramientas correspondiente a la configuración de la modelación se destacan algunas secciones que son indispensables, estas se muestran en la Figura 85. A continuación, se describirán estas secciones, su definición e importancia para la modelación.

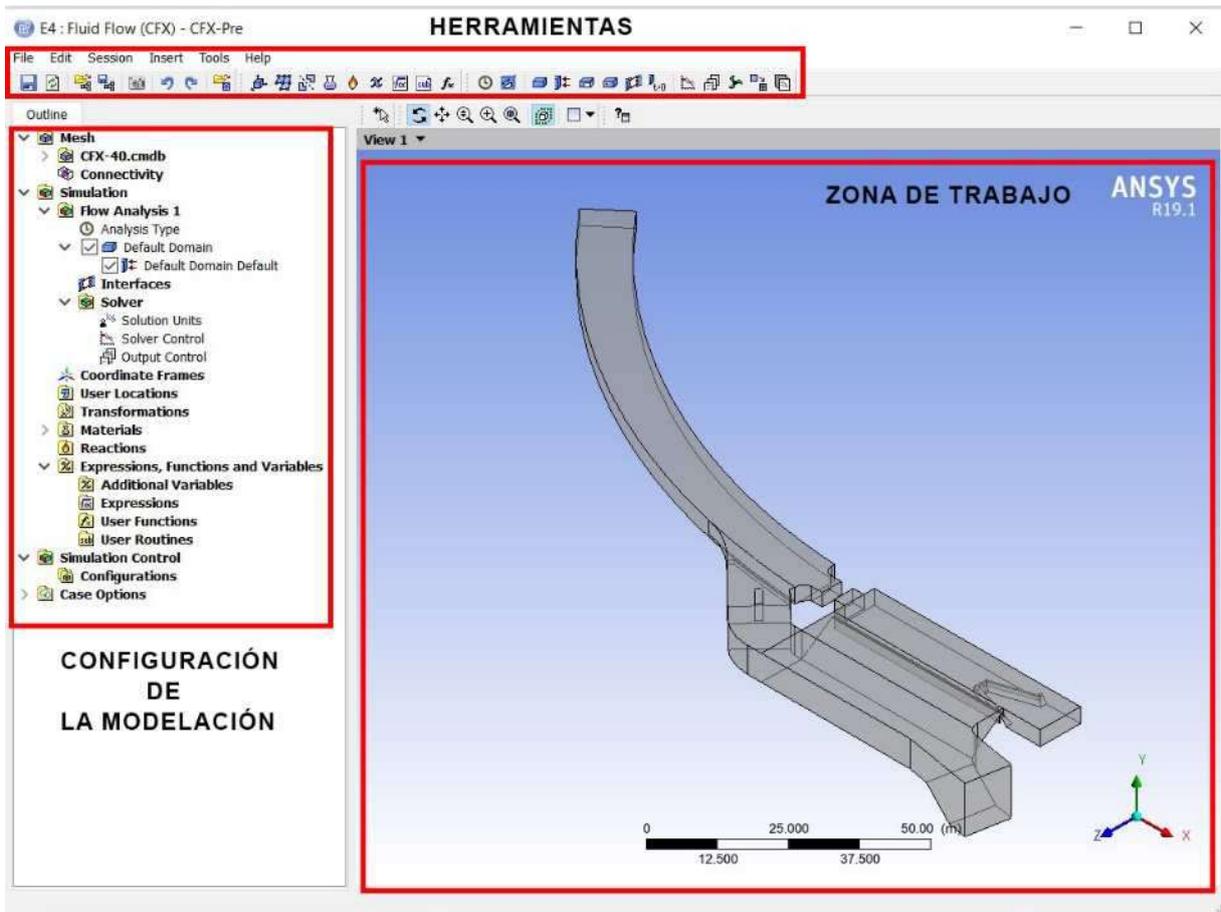


Figura 84. Vista preliminar del Setup.

Fuente: Elaboración propia.

- **Analysis type:** aquí se definirá el análisis para el programa, sea estacionario o transitorio. Para este último es necesario especificar datos adicionales como el tiempo total, el paso de tiempo y el tiempo inicial.
- **Default domain:** en esta ventana se colocan las configuraciones generales que corresponden al dominio estudiado, como la flotabilidad, la gravedad en el eje y, el modelo multifase, el modelo de turbulencia y los fluidos que actuarán.
- **Solution units:** aquí se especifican las unidades de los principales parámetros de la modelación como la masa, longitud y tiempo que tendrá en cuenta el solucionador.
- **Solver control:** en esta ventana se configura las consideraciones que el solucionador tendrá para ejecutar la modelación. Algunas de las principales son el valor residual de convergencia, el valor máximo para la conservación de las variables que se mide con los imbalances, etc.
- **Output control:** con esta sección se finaliza las configuraciones que corresponden al solucionador, ingresando las fórmulas para calcular las variables que se desea encontrar en los distintos puntos de monitoreo. Para el caso de análisis transitorios se coloca

también cada cuántas iteraciones se debe guardar los resultados de la modelación dado que; si se guardan todas, tendríamos un archivo muy pesado.

- **Expressions:** en algunas modelaciones es necesario ingresar expresiones para definir de mejor forma la física que se presenta en las diferentes condiciones de contorno y en la configuración general del dominio, estas expresiones se ingresan desde esta sección.

Para dar inicio a la configuración del proyecto se debe ingresar a las ventanas de configuración precisadas en la Figura 85. Para esto, es necesario dar un clic derecho y en las opciones luego seleccionamos *edit*; el programa nos direccionara hacia las ventanas correspondientes. Este proceso se explicará a continuación detallando las configuraciones colocadas en el análisis transitorio y estacionario que se realizó para esta parte de la investigación.

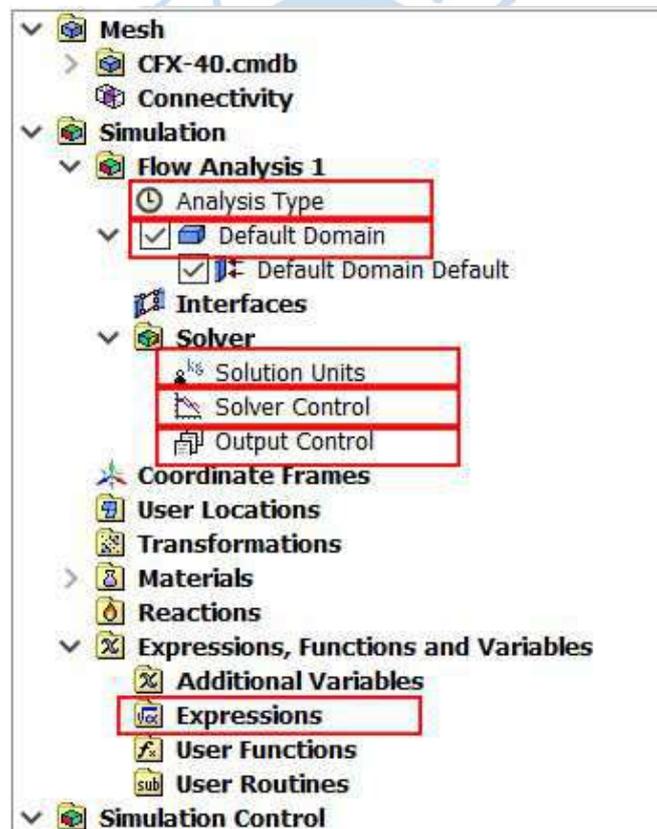


Figura 85. Configuración del *Setup*.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.1. Expresiones

En primer lugar, se detallará las expresiones que se utilizarán posteriormente en la configuración de la modelación tanto para el análisis transitorio como estacionario. En esta modelación se representa un flujo de superficie libre por lo que se requiere condiciones iniciales además de las condiciones de frontera. Para ingresar las condiciones iniciales se necesita

configurar campos de fracción de presión y volumen apropiados, para lograr este objetivo se define ciertas expresiones. A continuación, se explicarán las consideraciones que se tomaron en cuenta para definir las (ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016):

- Sabemos que la superficie libre representa el límite entre la fase agua con la del aire en el dominio. Por esta razón en la condición de frontera de entrada es necesario definir sobre la superficie libre una fracción de volumen para el aire de 1 y para el agua de 0; y debajo de la superficie libre una fracción 0 para el aire y 1 para el agua. Esto quiere decir que se definirá debajo de la superficie libre el agua y encima el aire.
- La condición de frontera de salida será gobernada por la presión. La fase del aire se definirá con una presión constante y la presión debajo de la superficie libre de la fase agua tendrá una distribución hidrostática. Para lograrlo se requiere tener la altura o tirante aproximado del fluido en la ubicación de salida, no es necesario ingresar una altura exacta por lo que es suficiente con una aproximación. Es necesario especificar esta condición de frontera de esta manera para forzar el flujo aguas abajo hacia el régimen supercrítico.
- En las condiciones iniciales del dominio se debe precisa una distribución de presión similar a la indicada en la condición de frontera de salida.

Habiendo descrito las condiciones tomadas en cuenta para formular las expresiones pasaremos a describir el procedimiento para configurarlas en el software. Primero hacemos clic derecho en *Expressions*, luego vamos a *Insert* y finalmente *Expression* como lo muestra la Figura 86.

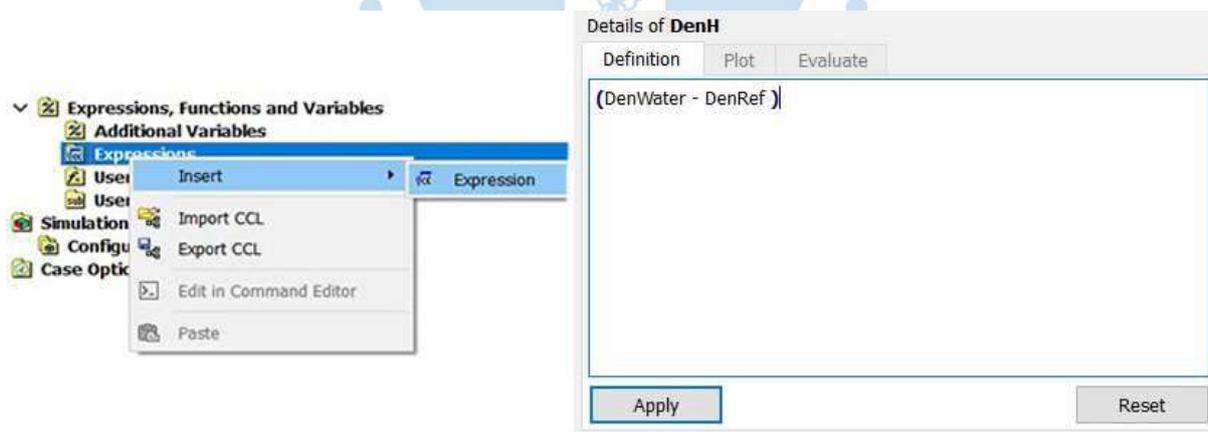


Figura 86. Ingreso de expresiones.

Fuente: Elaboración propia.

Se establece el nombre de la expresión y clic en aceptar; luego se abrirá una ventana como en la Figura 86 para definir la expresión. El mismo procedimiento se utilizó para todas las expresiones descritas en la Tabla 10. Estas fueron redactadas tomando como referencia el manual de *CFX Tutorials* elaborado por ANSYS. INC (2015).

Tabla 10. Expresiones de la modelación.

Descripción	Nombre	Definición
Tirante de la superficie libre aguas abajo	<i>DownH</i>	0.36 [m]
Tirante de la superficie libre aguas arriba	<i>UpH</i>	2.47 [m]
Densidad del fluido	<i>DenWater</i>	997 [kg m ⁻³]
Densidad de referencia de flotabilidad	<i>DenRef</i>	1.185 [kg m ⁻³]
Densidad calculada del fluido	<i>DenH</i>	(DenWater - DenRef)
Fracción de volumen de aire aguas arriba	<i>UpVFAir</i>	step((y-UpH)/1[m])
Fracción de volumen de agua aguas arriba	<i>UpVFWater</i>	1-UpVFAir
Distribución de presión aguas arriba	<i>UpPres</i>	DenH*g*UpVFWater*(UpH-y)
Fracción de volumen de aire aguas abajo	<i>DownVFAir</i>	step((y-DownH)/1[m])
Fracción de volumen de agua aguas abajo	<i>DownVFWater</i>	1-DownVFAir
Distribución de presión aguas abajo	<i>DownPres</i>	DenH*g*DownVFWater*(DownH-y)

Fuente: Elaboración propia.

Las expresiones *DownH* y *UpH* corresponden a las coordenadas absolutas en el eje Y del tirante de aguas abajo y aguas arriba respectivamente. *UpH* se encontró sumando las coordenadas en Y de la base del canal y el tirante medido en el primer aforo detallado en el acápite 4.2.3; por esta razón con un tirante de 2.38 m y la coordenada en el eje Y de la base igual a 0.09 m le corresponde a la expresión 2.47 m. Por otro lado, *DownH* corresponde al tercer aforo cuyo tirante fue de 0.36 m.

La expresión *DenRef* corresponde a la densidad de referencia de flotabilidad, este valor se define como la densidad del fluido más ligero; esto le da una interpretación intuitiva de la presión al programa. Para esta modelación se tomó la densidad del aire a 25 °C cuyo valor es de 1.185 kg/m³ según el Anexo C. Además, la expresión *DenWater* corresponde a la densidad del agua a 25° C según el Anexo D.

La expresión *DenH* se refiere a la diferencia de presiones entre las fases. Luego utilizando la función *step* del software se indica al software la fracción de volumen de aire aguas abajo (*DownVFAir*) y la fracción de volumen de aire aguas arriba (*UpVFAir*). Esta función configura un perfil de paso, por ejemplo, asigna un volumen de fracción de aire igual a 1 por encima del *UpH* en la expresión *UpVFAir* y con el valor del tirante de *DownH* en la expresión *DownVFAir*. Luego a partir de este volumen de aire se calculan los volúmenes de fracción de agua correspondientes en las expresiones *UpVFWater* y *DownVFWater* (ANSYS. INC, CFX Tutorials, 2015).

Finalmente, con expresiones encontradas se encuentran la distribución de presión aguas abajo (*DownPres*) y la distribución de presión aguas arriba (*UpPres*); partiendo de la fórmula de presión en fluidos en función de densidad, gravedad y altura. Todas las expresiones se ingresarán a lo largo de la modelación en las diferentes ventanas del *Setup* en las condiciones de frontera.

5.2.2.2. Análisis transitorio

Como se explicó en los capítulos anteriores un análisis del tipo transitorio se encuentran en función del tiempo por lo tanto es necesario definir un tiempo inicial, un paso de tiempo y una duración total o tiempo total; los criterios para la elección de estos se explican en el acápite 2.2.8.2. Para configurar este análisis es necesario ingresar a la sección de *Analysis Type* los siguientes datos:

- **Tiempo total:** es de 3 a 5 veces el tiempo de residencia de una partícula de fluido en el dominio estudiado. Utilizando la Ecuación 1 – 35 encontramos el tiempo de residencia, hallando primero el recorrido de la partícula como se muestra en la Figura 87. Para el cálculo del tiempo de residencia del flujo se consideró una velocidad media de 2.6 m/s. Esta velocidad se tomó de modelaciones realizadas.

$$t_r = \frac{L_D}{c_m} = \frac{105.05 + 28.94 + 25.48 + 18.10 + 31.25}{2.6} = \frac{208.82}{2.6} = 80.31 \text{ s}$$

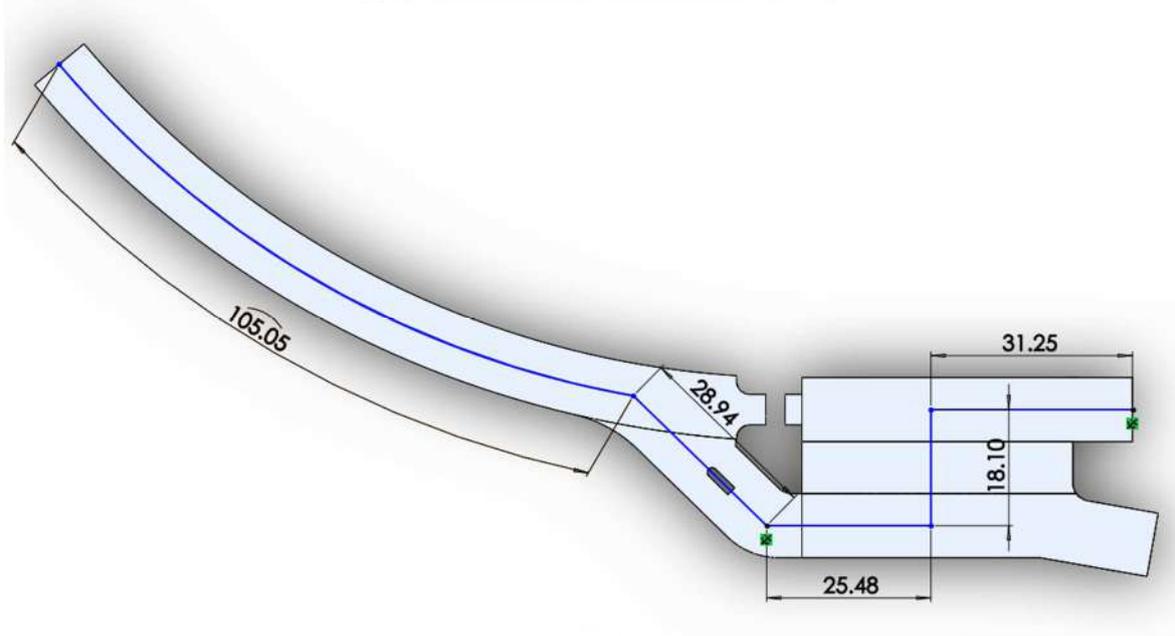


Figura 87. Recorrido promedio de una partícula en el dominio.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el tiempo total se consideró 3 veces el tiempo de residencia obteniendo 240 s el que se precisó en el menú de tipo de análisis como se detalla en la Figura 88.

- **Intervalo de tiempo:** se define considerando algunas variables hidráulicas como el número de Courant (C), la velocidad media del flujo (c_m) y otras numéricas como el tamaño de elemento más pequeño en la zona de flujo libre para la malla media (Δx). Se define utilizando la Ecuación 1 – 36:

$$\Delta t_t = \frac{C\Delta x}{c_m} = \frac{3 * 0.5}{2.6} = 0.57 - 0.5$$

Finalmente se consideró un valor de 0.5 s para el intervalo de tiempo el cual fue ingresado en la ventana de tipo de análisis (Figura 88).

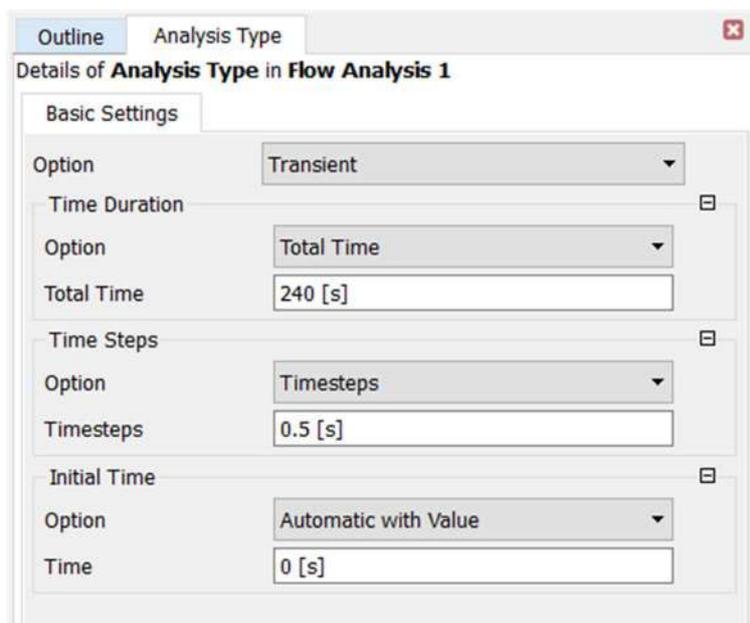


Figura 88. Consideraciones para análisis transitorio.

Fuente: Elaboración propia.

Pasamos a detallar en el *Setup* las configuraciones correspondientes al dominio. Para esto damos clic derecho en *Default domain* y *edit*, luego se precisan las siguientes configuraciones:

- **Basic Settings:** En esta parte de la ventana *Default domain* se configurará los fluidos presentes en el dominio y algunos datos generales. Todo esto se realiza en la ventana de la Figura 90. Primero se ingresa desde la librería del programa los fluidos presentes en el dominio, para esta modelación ingresaremos agua y aire. El procedimiento a seguir se muestra en la Figura 89.

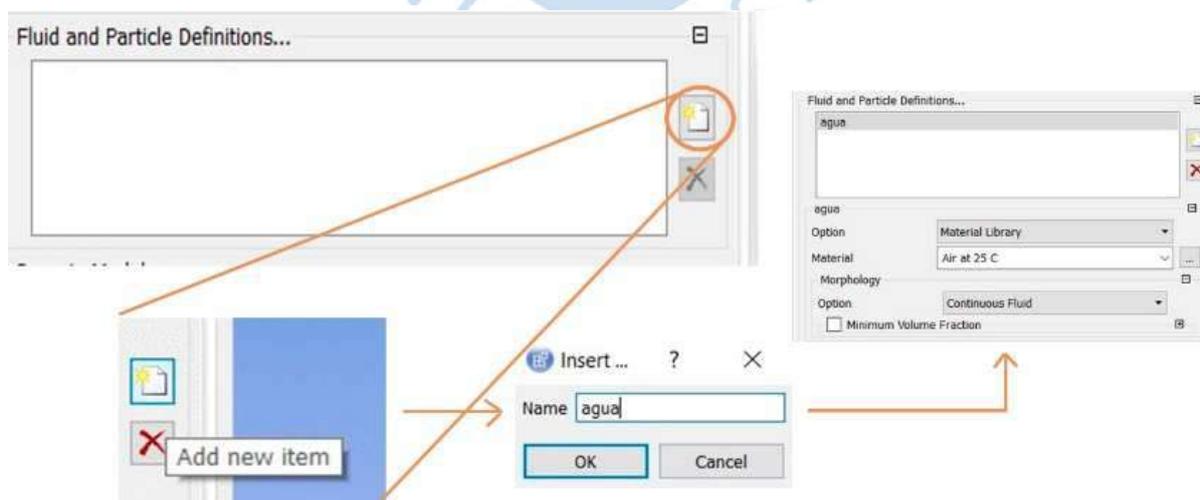


Figura 89. Configuración de fluidos en el dominio.

Fuente: Elaboración propia.

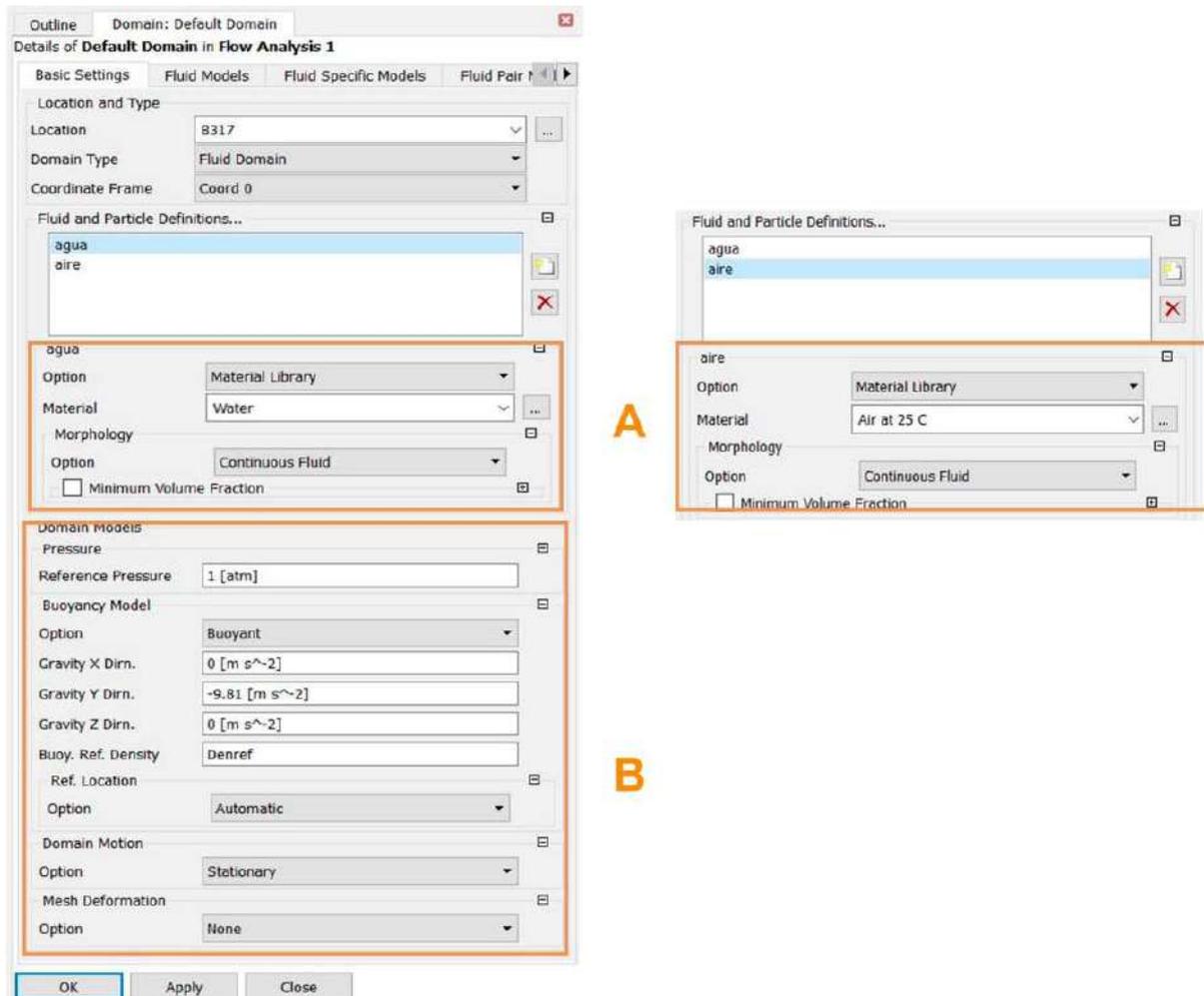


Figura 90. Configuraciones básicas del dominio.

Fuente: Elaboración propia.

Ingresados los fluidos se procede a colocar en el programa las configuraciones que se detallan a continuación, cuyas letras se precisan en la Figura 90.

A. **Definición de fluidos y partículas** (*fluid and particles definitions*): en esta parte se visualiza los fluidos que son parte del flujo multifásico (agua y aire); además se configura la morfología (*Morphology*) de ambos, para esta modelación es continua (*Continuous fluid*) debido a que no existe una mezcla entre los mismos. El programa calculará automáticamente el porcentaje de mezcla entre ambos.

B. **Modelos del dominio** (*domain models*):

- Presión (*Pressure*): es presión de referencia con un valor de 1 atm.
- Modelo de flotabilidad (*Bouyancy model*): para definir la flotabilidad se define la fuerza de la gravedad como -9.81 m/s^2 en la dirección del eje Y, y la densidad de referencia de la flotabilidad a través de la expresión “*DenRef*”.
- Movimiento de dominio (*Domain motion*): se puede configurar un dominio rotativo en esa sección. Para nuestro propósito será estacionario.

- **Fluid models:** En esta parte se configurará los diferentes modelos que se deben colocar en la modelación para asemejar el comportamiento del fluido a la realidad; por ejemplo, los modelos multifase y los de turbulencia estudiados en la sección 2.2.

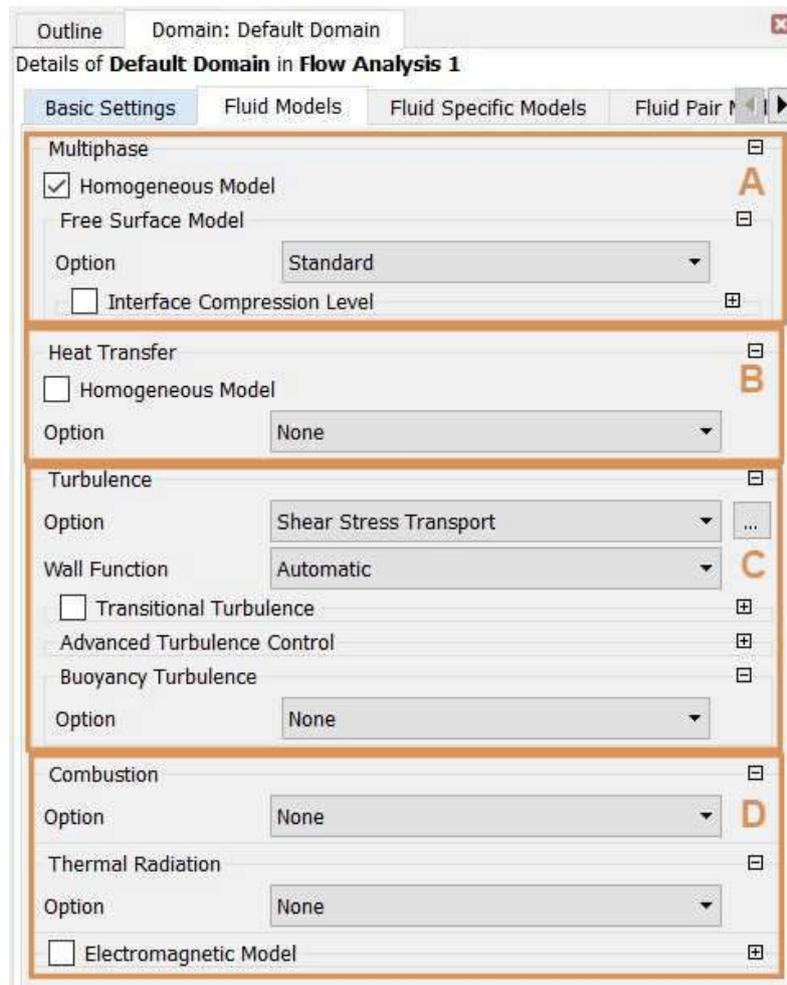


Figura 91. Configuraciones de modelos de fluidos.

Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 91 se detallará a continuación las diferentes configuraciones:

- Multifase (multiphase):** se considerará un modelo multifase homogéneo dado que se presentan fases continuas, es decir no se interpenetran y presentan una superficie libre discernible donde el agua es el fluido primario.
 - Transferencia de calor (heat transfer):** no se tomará en cuenta ninguno modelo de transferencia de calor debido a que no se presenta en la estructura estudiado.
 - Turbulencia (turbulence):** se usará el modelo *Shear Stress Transport* o STT ya que describe de mejor forma la interacción entre el fluido y la pared.
 - Combustión o radiación termal:** no se configurará debido a que no es de interés para el proyecto estudiado.
- **Fluid specific models:** Esta ventana se dejará por defecto como en la Figura 92.

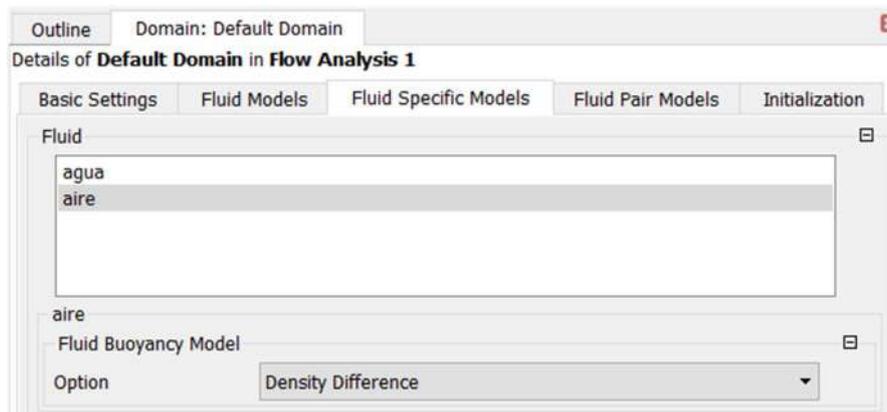


Figura 92. Configuraciones de modelos de fluido específicas.

Fuente: Elaboración propia.

- **Fluid pair models:** Se configurarán las opciones que se presenta en la Figura 93. En el modelo de transferencia entre las fases especificaremos el modelo de superficie libre (*free surface*), este ayuda al software a resolver en menor tiempo la modelación.

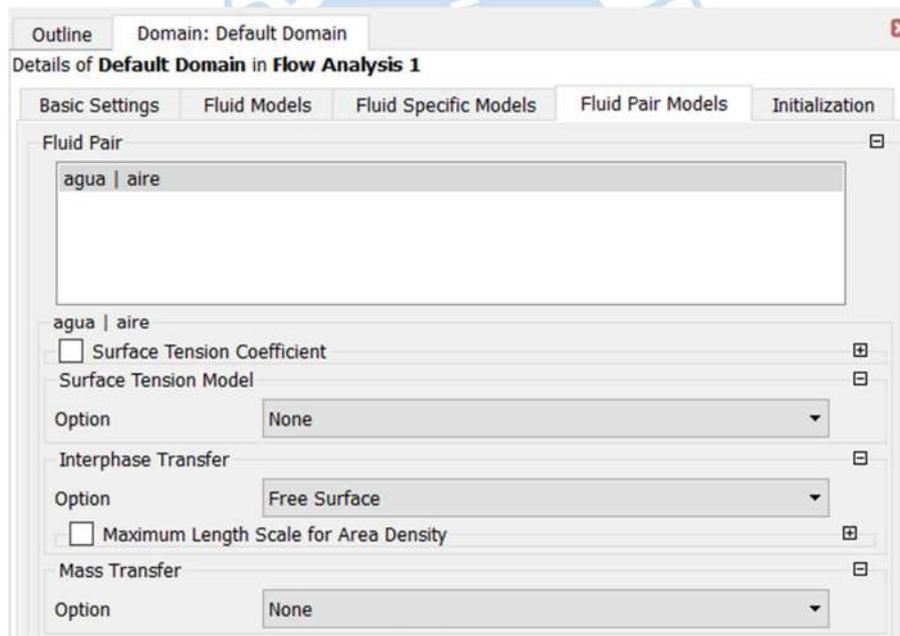


Figura 93. Configuraciones de modelos de par de fluido.

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso es ingresar las condiciones de borde o de frontera. Estas se aplican en las caras de la geometría y para facilitar este procedimiento se definió previamente la geometría donde se colocarían (Figura 71). Esta etapa en la modelación es importante dado que un error puede inducir a resultados alejados de la realidad o que no se produzca la convergencia de la modelación.

A continuación, se describirán los pasos para definir las, primero damos un clic derecho en *Default domain*, luego en *Insert* y clic en *Boundary* (Figura 94). Finalmente colocamos un nombre a la condición de frontera y procedemos a ingresar las siguientes configuraciones.

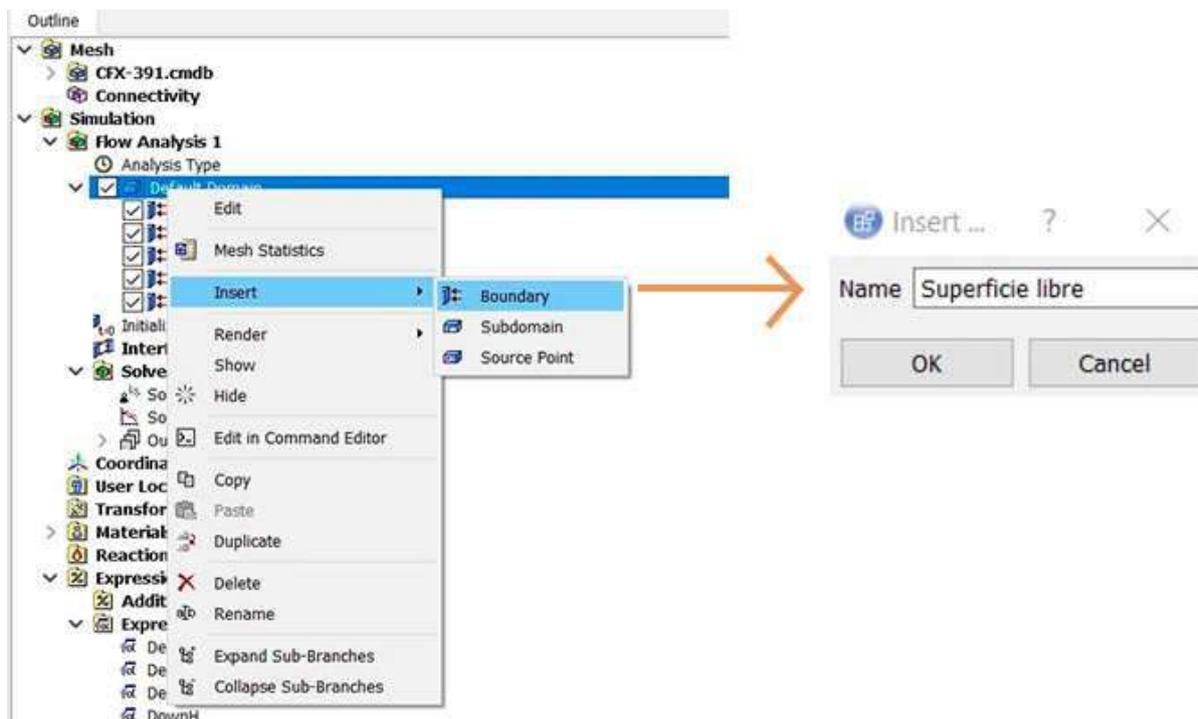


Figura 94. Insertar condiciones de frontera.

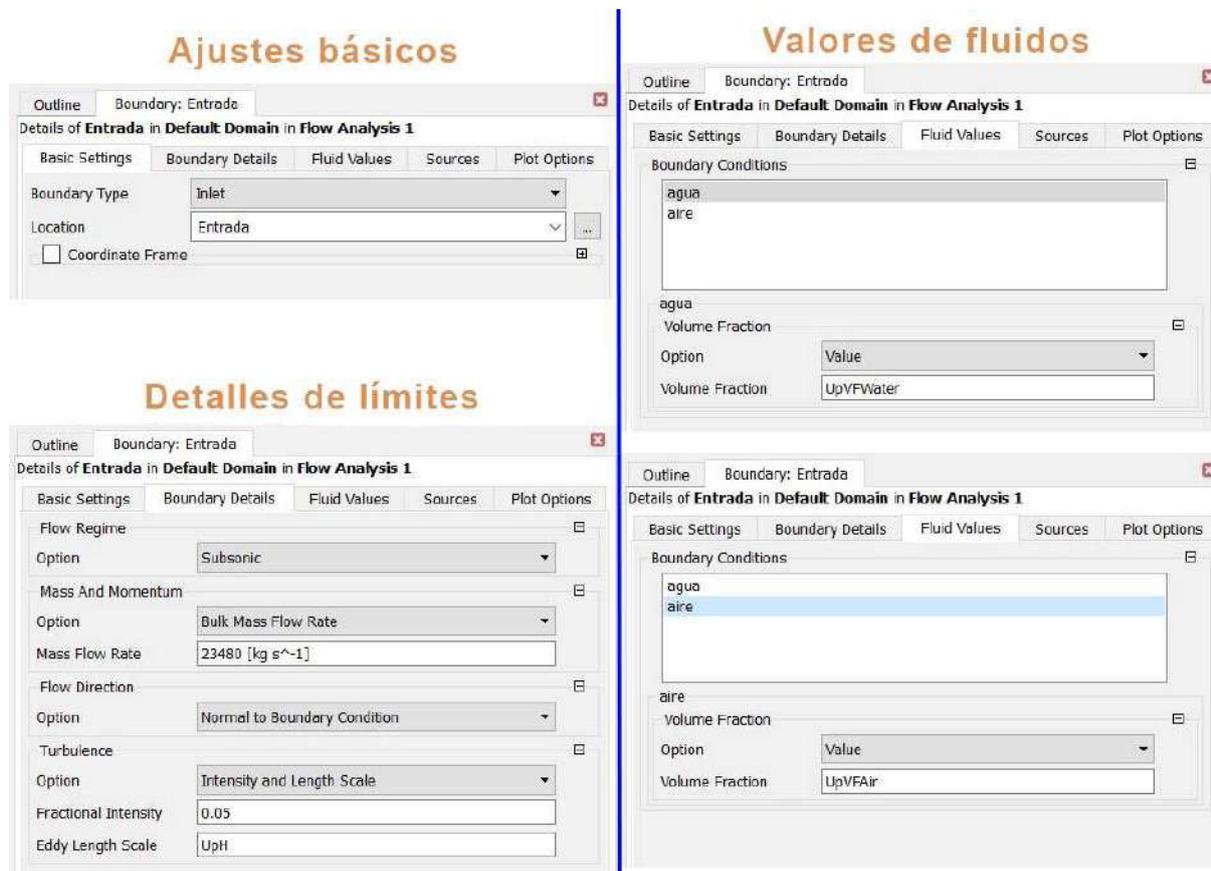
Fuente: Elaboración propia.

1. **Primera condición de frontera, ENTRADA:** los datos con lo que se configuró esta condición de frontera se presentan en la Tabla 11 y la Figura 95. Algunas consideraciones para esta condición de frontera se presentan a continuación:
 - El tipo de límite *Inlet* representa la posibilidad de solo entrada de flujo.
 - El régimen del flujo se define como subsónico (*Subsonic*), ya que presenta velocidades menores a la velocidad del sonido.
 - El ingreso de fluido se configuró como flujo másico (*Bulk Mass Flow Rate*) con un caudal de $23.48 \text{ m}^3/\text{s}$ obtenido del primer aforo realizado. Además, cabe destacar que la dirección del flujo es perpendicular a la ubicación de entrada.
 - La turbulencia se ingresó mediante una escala de intensidad y longitud (*Intensity and Length Scale*), con una intensidad fraccional de 0.05 y una escala de longitud siguiendo la expresión “*UpH*” (ANSYS. INC, CFX Tutorials, 2015).
 - La fracción volumétrica de aire y agua también estará definida por las expresiones “*UpVFAir*” y “*UpVFWater*”. Esta opciones se muestran en la Figura 95 e indican al programa cual es la cantidad de agua y aire que ingresara por la cara de entrada. Cuando no se usa expresiones se suele colocar una fracción volumétrica de aire igual a 0 y una fracción volumétrica de agua de 1; esto quiere decir que ingresa agua por toda el área de entrada y el programa ira equilibrando la proporción entre fases a lo largo del dominio.

Tabla 11. Datos de condición de frontera ENTRADA.

ENTRADA		
Tipo de límite	<i>Inlet</i>	
Ubicación	Entrada	
Régimen de flujo	<i>Subsonic</i>	
Masa y momento	<i>Bulk Mass Flow Rate</i>	
Caudal másico	23480 [kg/s]	
Dirección del flujo	<i>Normal to boundary condition</i>	
Turbulencia	Opción	<i>Intensity and Length Scale</i>
	Intensidad fraccional	0.05
	Escala de longitud Eddy	<i>UpH</i>
Fracción volumétrica del aire	<i>UpVFAir</i>	
Fracción volumétrica del agua	<i>UpVFWater</i>	

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 95.** Condición de frontera: ENTRADA.

Fuente: Elaboración propia.

2. **Segunda condición de frontera, FONDO:** en esta condición de frontera se encuentran seleccionadas las caras del fondo del canal, bocatoma y cámara de carga. Las configuraciones se detallan en la Figura 96 y Tabla 12, algunas consideraciones que se tomaron fueron:

- El tipo límite *Wall* nos indica que la geometría seleccionada será una pared.
- Se define la masa y momento como “*No Slip Wall*” o sin deslizamiento en las paredes, lo que quiere decir que el fluido tiene una velocidad igual a cero en la

pared. Existe además otra configuración llamada “*Free Slip Wall*” o deslizamiento libre en paredes, esto indica que no hay fricción entre el fluido y la pared. Finalmente, configuramos nuestra condición de frontera con “*No slip Wall*” y con la opción “*Rough Wall*” o rugosidad en la pared (ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016). La rugosidad total se consideró 0.36 mm correspondiente al concreto simple (Anexo E)

Tabla 12. Datos de condición de frontera FONDO.

FONDO		
Tipo de límite	Wall	
Ubicación	Fondo	
Masa y momento	No Slip Wall	
Rugosidad de la pared	Opción	Rough Wall
	Rugosidad del grano de arena	0.36 mm

Fuente: Elaboración propia.

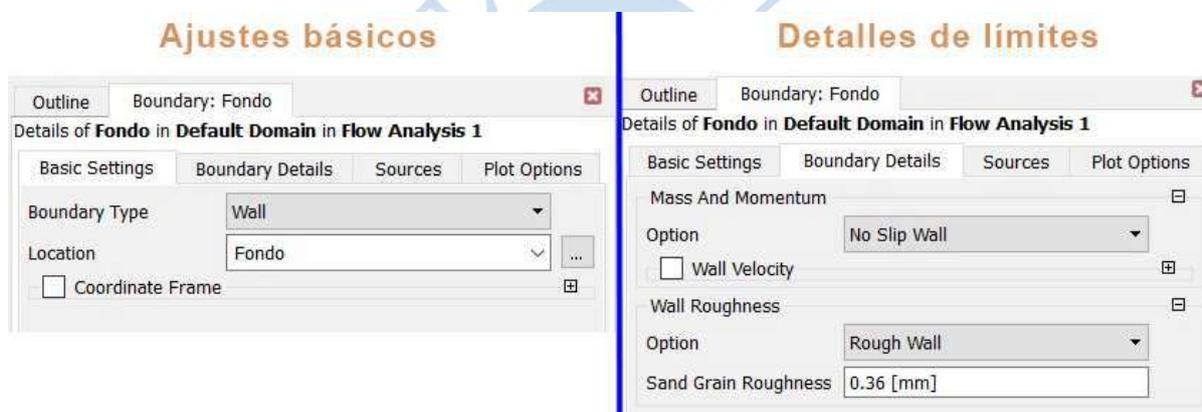


Figura 96. Condición de frontera: FONDO.

Fuente: Elaboración propia.

3. **Tercera condición de frontera, PAREDES:** la configuración de esta condición de borde es muy parecida al FONDO, se seleccionó la rugosidad que corresponde al concreto. El tipo de límite se indicó como pared como en la Figura 97 y la Tabla 13, y su ubicación se encuentra en las paredes del modelo geométrico.

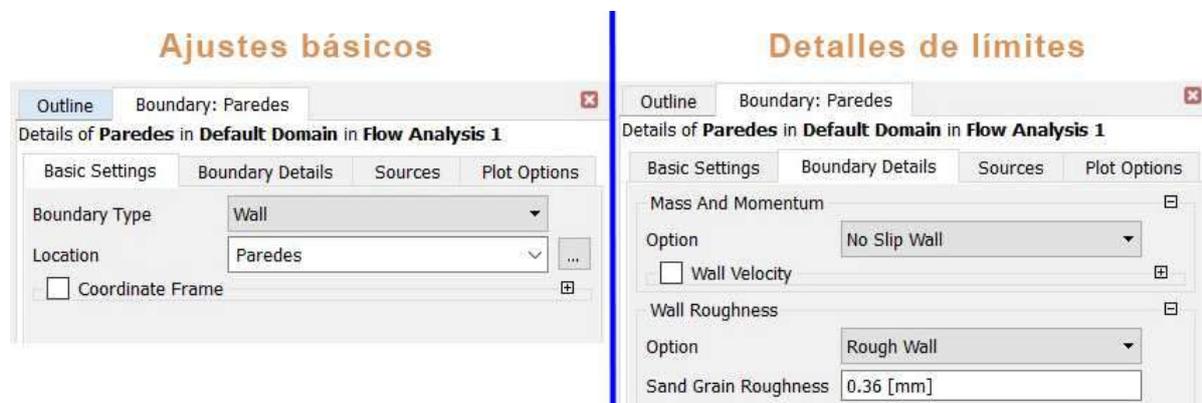


Figura 97. Condición de frontera: PAREDES.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Datos de condición de frontera PAREDES.

PAREDES		
Tipo de límite		Wall
Ubicación		Paredes
Masa y momento		No Slip Wall
Rugosidad de la pared	Opción	Rough Wall
	Rugosidad del grano de arena	0.36 mm

Fuente: Elaboración propia.

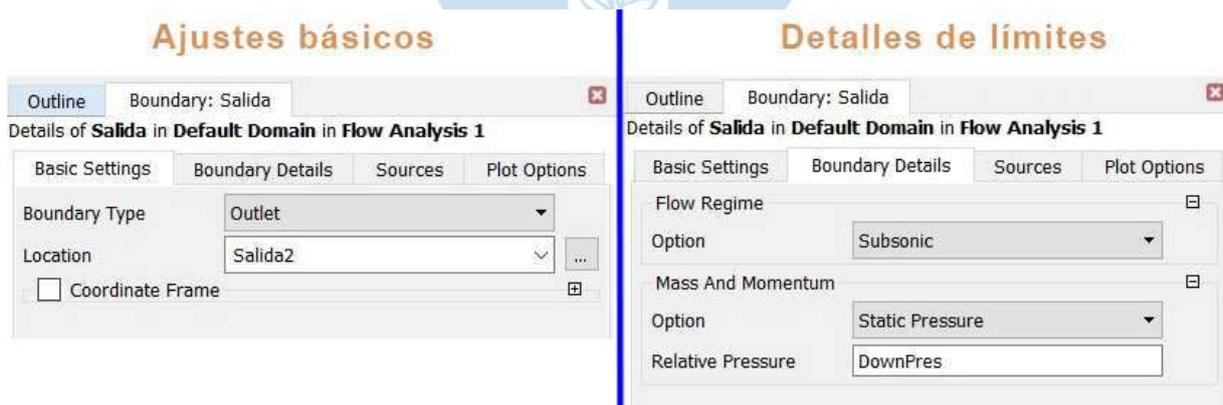
4. **Cuarta condición de frontera, SALIDA:** se inserta primero la condición de frontera siguiendo el procedimiento visto en la Figura 94. Luego se precisó en la ventana las configuraciones que se detallan en la Tabla 14 y la Figura 98. Algunas de las consideraciones que se tuvieron fueron:

- El tipo de límite se detalla como “*Outlet*” o salida, este quiere decir que por esta sección solo puede salir fluido. La ubicación se tomó en la geometría seleccionada como Salida2 (Figura 71).
- El régimen del flujo es subsónico como se explicó anteriormente.
- Para definir la masa y momento se seleccionó la opción de presión estática ingresándola desde la expresión “*DownPres*”.

Tabla 14. Datos de condición de frontera SALIDA.

SALIDA	
Tipo de límite	<i>Outlet</i>
Ubicación	Salida2
Régimen de flujo	<i>Subsonic</i>
Masa y momento	<i>Static Pressure</i>
Presión relativa	<i>DownPres</i>

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 98.** Condición de frontera: SALIDA.

Fuente: Elaboración propia.

5. **Quinta condición de frontera, SUPERFICIE_LIBRE:** se asigna a la parte superior del dominio; se coloca para simular la entrada y salida de aire entre el domino y el ambiente. Algunas de las consideraciones para configurarla son (Figura 99):

- El tipo de límite se ingresó “*opening*”, lo cual representa la entrada y salida de flujo.

- La masa y momento se define como “*Entrainment*” o arrastre, esta opción representa un fenómeno atmosférico que ocurre cuando un flujo turbulento captura un flujo no turbulento, se le asigna 0 pascales (ANSYS. INC, CFX Tutorials, 2015).
- La turbulencia se determinó como “Zero gradient” o gradiente cero, lo que indica a la modelación que todas las variables se establecen en un valor constante en la ubicación de la condición de contorno (ANSYS. INC, CFX Tutorials, 2015).
- Se precisó una fracción volumétrica de aire igual a 1 y de agua igual a 0, esto el software lo interpreta como salida total de aire por la ubicación asignada.

Tabla 15. Datos de condición de frontera SUPERFICIE LIBRE.

SUPERFICIE LIBRE	
Tipo de límite	<i>Opening</i>
Ubicación	Superficielibre
Régimen de flujo	<i>Subsonic</i>
Masa y momento	<i>Entrainment</i>
Presión relativa	0 [Pa]
Turbulencia	<i>Zero Gradient</i>
Fracción volumétrica del aire	1
Fracción volumétrica del agua	0

Fuente: Elaboración propia.

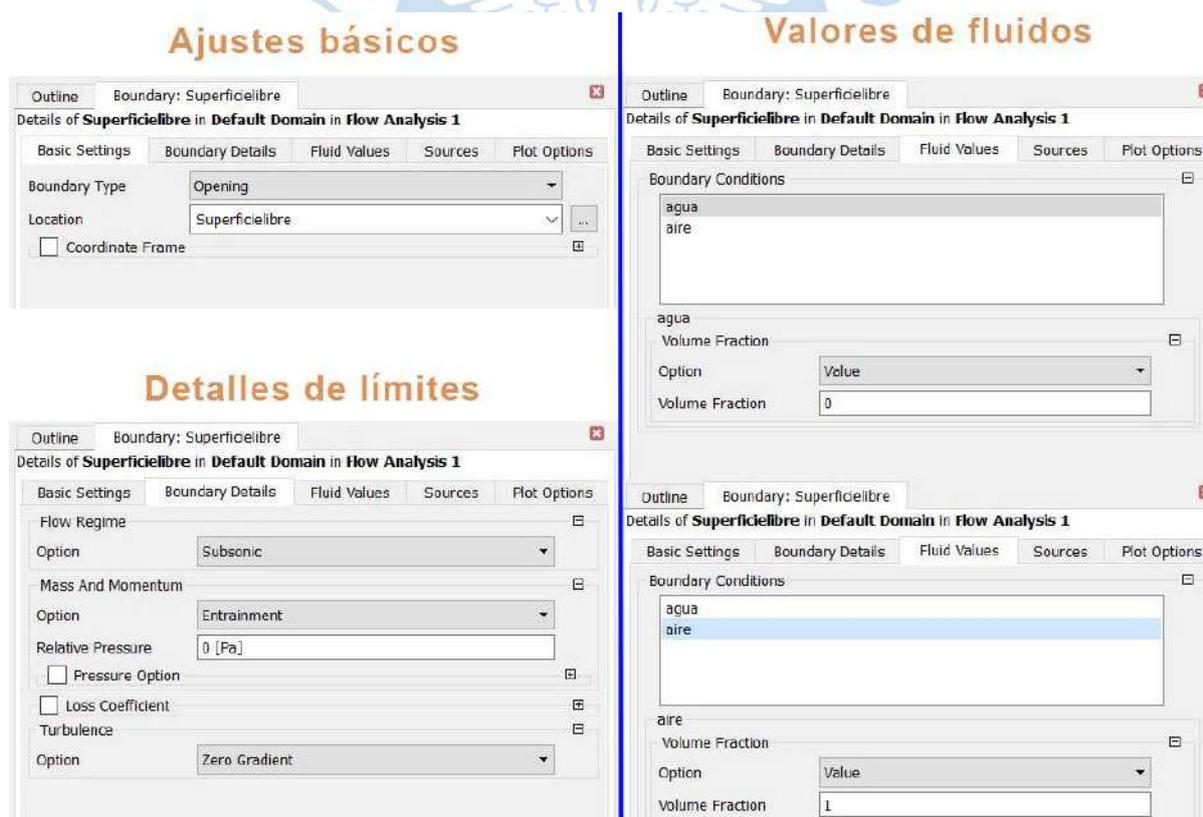


Figura 99. Condición de frontera: SUPERFICIE LIBRE.

Fuente: Elaboración propia.

Ingresadas todas las condiciones de frontera se mostrarán en la parte izquierda del área de trabajo como parte del *Default Domain* (Figura 100). Además, el dominio indicará algunas

condiciones de frontera mediante flechas. Por ejemplo, las condiciones de entrada y salida se muestran con flechas negras en un solo sentido debido a que solo se produce salida o ingreso de fluidos; y en a condición de superficie libre se muestran flechas azules en los dos sentidos para representar el tipo de límite *opening*.

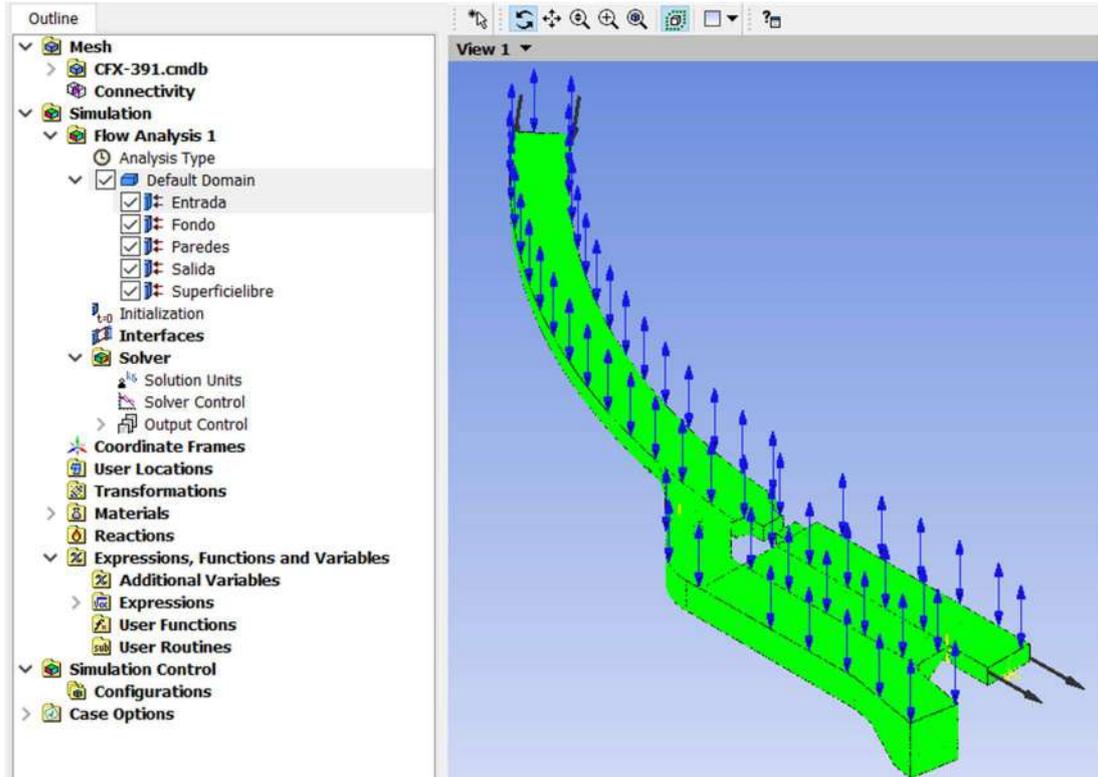


Figura 100. Condiciones de frontera en dominio.

Fuente: Elaboración propia.

Después de configurar las condiciones de frontera se procede a configurar las unidades de solución o *solution units*, para el objetivo de esta modelación se consideraron las unidades por defecto cómo se detalla en la Figura 101.

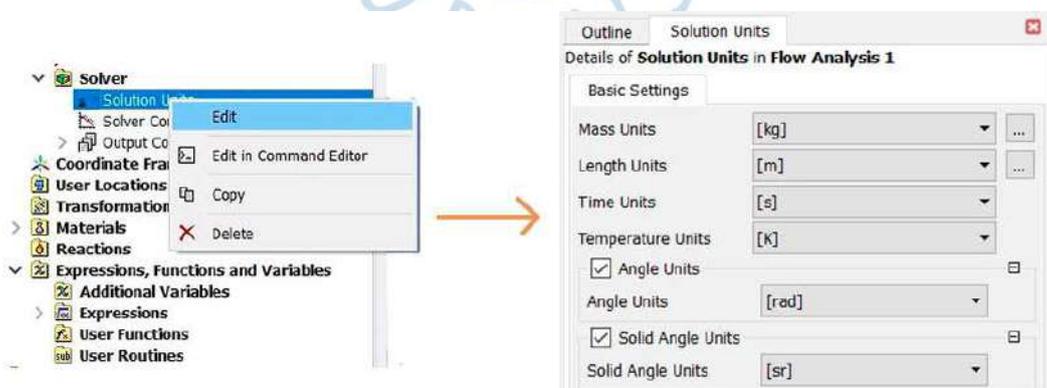


Figura 101. Configuración de unidades de solución.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con la configuración de la modelación se detallará a continuación las consideraciones que se tuvieron para configurar el *Solver control* (Figura 102). Esta parte tiene

una importancia vital debido a que algunas opciones pueden influir en el tiempo de solución y la calidad de los resultados. Primero hacemos un clic derecho en la opción *Solver control* para luego seleccionar *Edit*.



Figura 102. Configuración de *Solver Control*.

Fuente: Elaboración propia.

Se colocarán en la ventana las opciones que se muestran en la Figura 102, para llegar a esa configuración se ha tenido en cuenta lo siguiente:

- Esquema de advección** (*Advection scheme*): se fijó con la opción de *High Resolution*, la que permite obtener una mejor resolución numérica para este tipo de modelaciones (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016).
- Esquema transitorio** (*Transient scheme*): se utilizó la opción *Second Order Backward Euler* o segundo orden hacia atrás. Esto indica al software que debe utilizar ecuaciones de un orden superior, debido a que de esta forma se obtiene un resultado más preciso e independiente de la malla. La principal diferencia entre el primer y segundo orden son los puntos utilizados para el cálculo. Por lo general es mejor utilizar el esquema de segundo

orden, porque utiliza dos y no un solo punto aguas arriba (ANSYS. INC, CFX Solver modeling guide, 2016).

- c. **Turbulencia numérica** (*Turbulence numerics*): el modelo de turbulencia se fijó en *High Resolution* con el fin de obtener el mejor resultado numérico.
- d. **Control de convergencia** (*Convergence control*): en esta parte se configurará algunos parámetros relaciones con el análisis transitorio. Aquí se define el número mínimo y máximo de *loops* por cada paso de tiempo, es decir se definen el número de iteraciones que el programa realizará en cada *time step* o paso de tiempo (Figura 31). Dependiendo de la física analizada se puede necesitar más o menos *loops*. Para el propósito de esta modelación se han dejado por defecto, con un mínimo de 1 loop y un máximo de 10 (ANSYS. INC, CFX-Pre User's Guide, 2016).
- e. **Criterios de convergencia** (*Convergence criteria*): en esta sección se procedió a detallar los valores que deben tener ciertos criterios para asegurar la convergencia. En el acápite 2.2.9 se detalló el significado de los residuales promedio (*Residual type*) y *imbalances* (*Conservation target*); para el propósito de esta modelación se precisó un residual de $1 \cdot 10^{-5}$ y un criterio de conservación de 0.01 o 1% (ANSYS. INC, CFX-Pre User's Guide, 2016).
- f. **Clase de ecuación** (*Equation class*): esta parte de la ventana se coloca con las configuraciones por defecto.
- g. **Control multifase** (*Multiphase control*): el último paso a seguir en opciones avanzadas es colocar que el programa considere los controles multifase para así mejorar la resolución o exactitud de la modelación. El acoplamiento de fracción de volumen o *Volume fraction coupling* mejorará la convergencia de los problemas impulsados por la flotabilidad, así se alcanzará en un menor tiempo la solución y se optimizarán los recursos computacionales (ANSYS. INC, CFX-Pre User's Guide, 2016).

Después es necesario configurar el *output control* ingresando a través del menú *edit*. Por consiguiente, se abrirá una ventana como se muestra en la Figura 103 y se precisarán los datos detallados a continuación. Es aquí donde se debe ingresar cada uno de los puntos de monitoreo. Para la configuración de la misma, se tiene en cuenta lo siguiente:

- A. **Frecuencia de salida** (*Output frequency*): en esta modelación se seleccionó la opción intervalo de tiempo o *timestep interval* y se precisó un valor de 50 en la frecuencia de guardado; es decir se guardarán los resultados cada 50 intervalos de tiempo como se configuro en la ventana que muestra la Figura 103. Esto se realiza para no tener un archivo de resultados muy pesado (ANSYS. INC, CFX-Pre User's Guide, 2016).

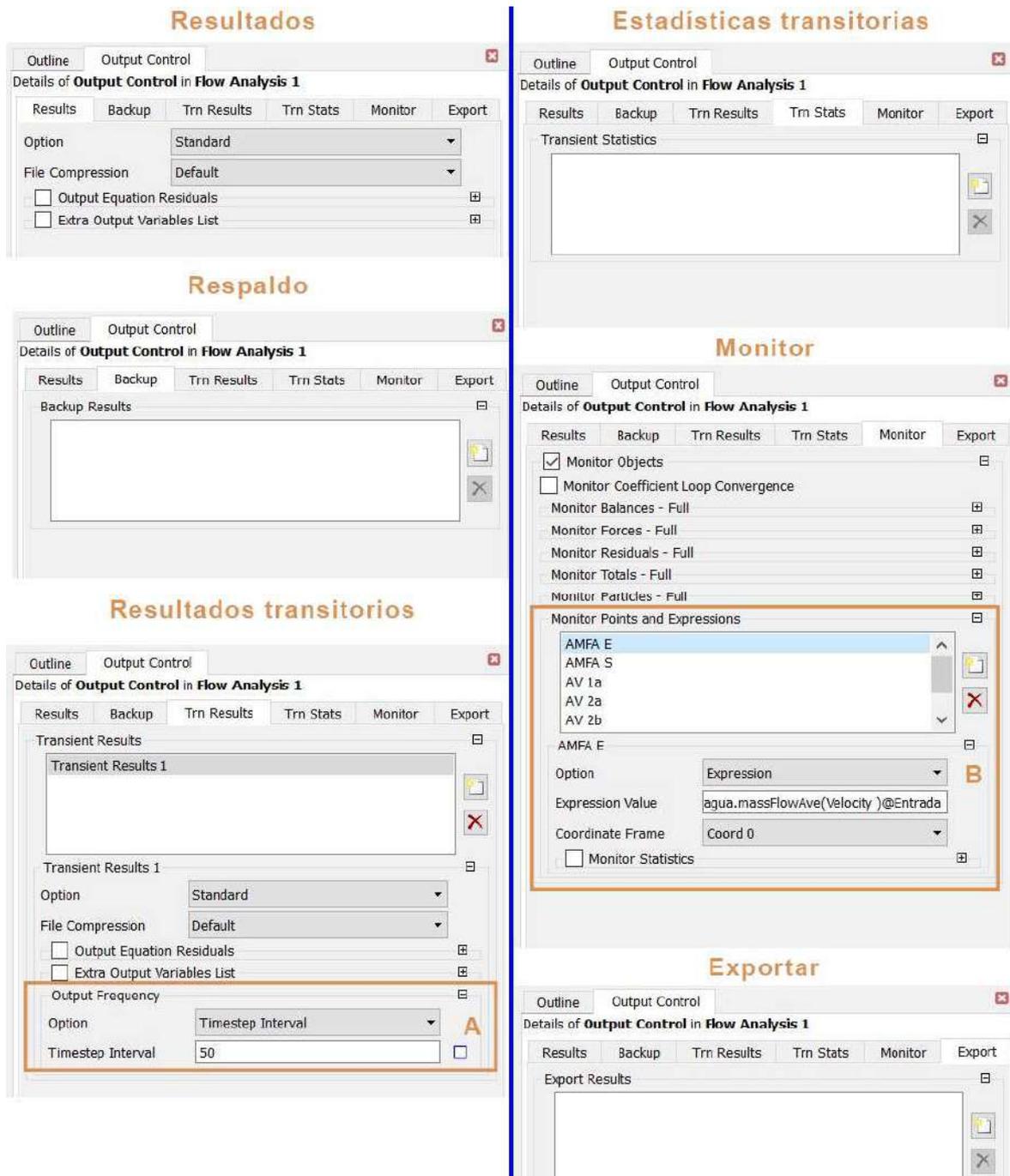


Figura 103. Configuración de *Output Control*.

Fuente: Elaboración propia.

- B. **Puntos de monitoreo y expresiones** (*Monitor points and expressions*): se ingresaron 7 puntos de monitoreo en diferentes ubicaciones del dominio. Cabe destacar que existen tres tipos de opciones para configurar los puntos de monitoreo:
- **Expresiones:** son utilizadas para monitorear una variable física respecto a un área. Para esta modelación se ingresó con expresiones el primer y segundo punto de monitoreo en la entrada y salida del dominio respectivamente. Las expresiones deben tener la siguiente estructura (ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016):

fase.función(variable)@ubicación

- **Fase:** viene a ser la fase que se tendrá en cuenta para calcular el punto de monitoreo en esa ubicación.
- **Función:** el software posee una gama de funciones para evaluar variables durante el cálculo de la solución o encontrar sus valores en el análisis resultados posterior. La función utilizada fue *massFlowAve* y calcula el promedio de una variable o expresión en la ubicación 2D especificada en función del flujo de masa local.
- **Variable:** el software dispone de una gran cantidad de variables físicas que se pueden ingresar en sus expresiones como temperatura, velocidad y presión, etc.
- **Ubicación:** es necesario seleccionar la ubicación 2D donde el software calculará la variable de interés.

El procedimiento para ingresar un punto de monitoreo, se detalla en la Figura 104, el primer paso es crear el punto de monitoreo desde el comando *Add new ítem*. Luego se procede a elegir la opción *Expression*, al realizarlo se activará la casilla *Expression value*. Para continuar damos clic derecho en esta casilla y se desplegaran las opciones para ingresar *functions*, *variables*, o *physics locators* (ubicación).

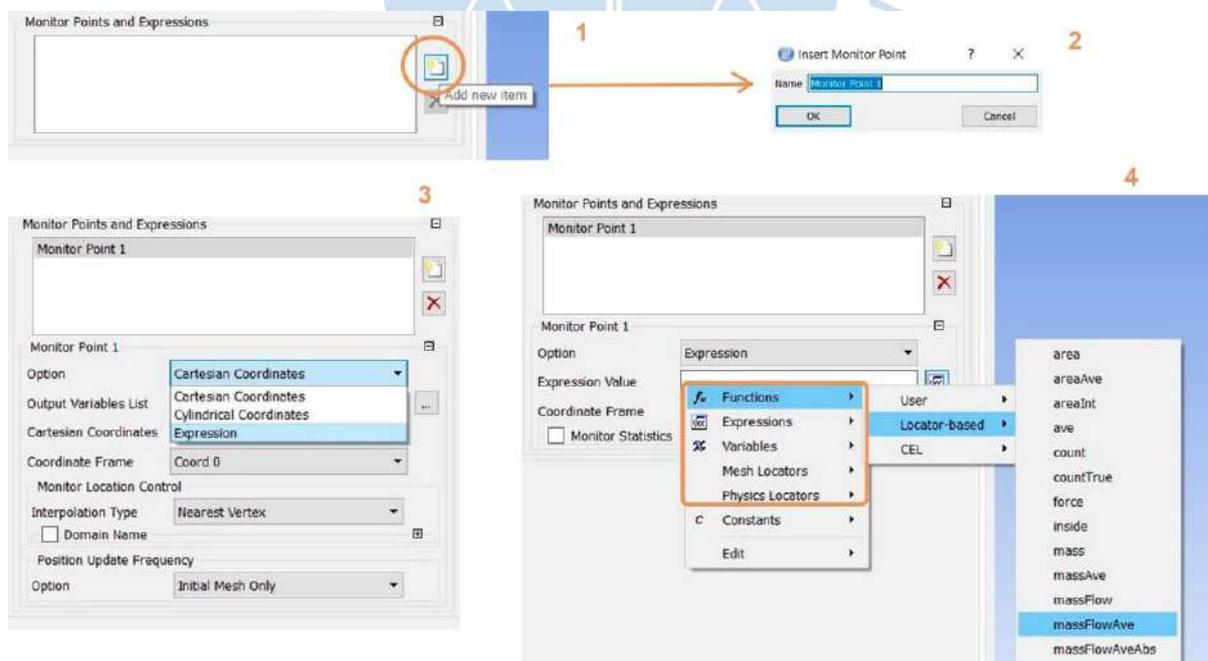


Figura 104. Expresión como punto de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

Creado el punto de monitoreo, ingresamos primero la función con el procedimiento descrito anteriormente. Luego se ingresa la variable y la ubicación

con el mismo procedimiento y al final se ingresa manualmente la fase colocando su nombre seguido de un punto delante de la expresión.

- **Coordenadas cartesianas:** también es posible crear un punto de monitoreo en una coordenada cartesiana. El procedimiento es el mismo que para una expresión, con la única diferencia que se configura como *Cartesian coordinates*. Luego se selecciona la variable que se desea y las coordenadas cartesianas del punto de monitoreo como en la Figura 105 (ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016).

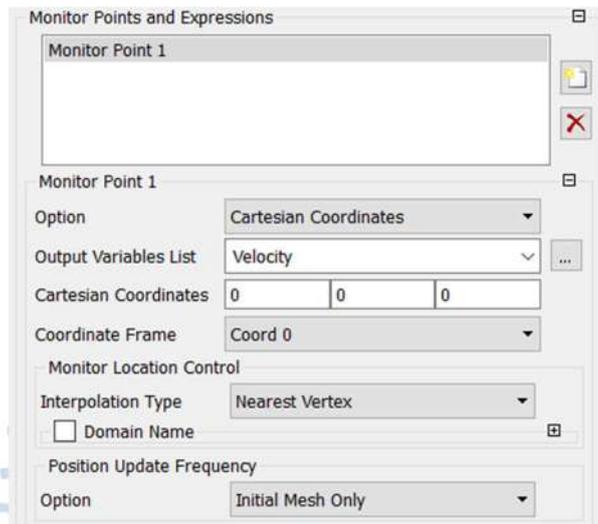


Figura 105. Punto de monitoreo como coordenada cartesiana.

Fuente: Elaboración propia.

- **Coordenadas cilíndricas:** es otra forma de evaluar un parámetro físico en una ubicación específica. Se ingresa la variable que se desea evaluar en la opción de *Output variables list* (Figura 106) y las componente de posición de las coordenadas cilíndricas (ANSYS. INC, CFX Reference guide, 2016).

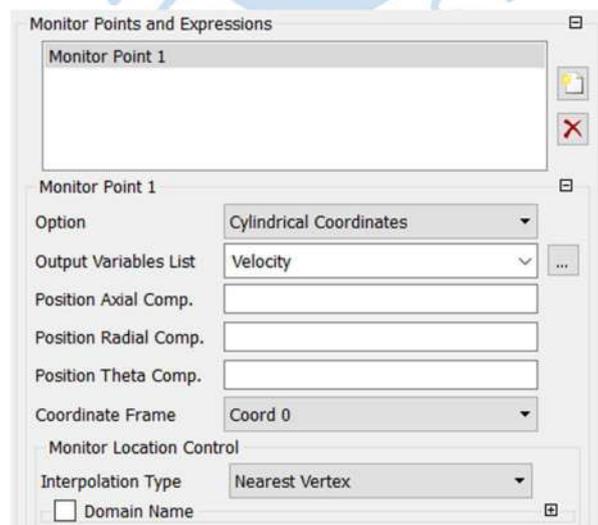


Figura 106. Punto de monitoreo como coordenada cilíndrica.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, después de comprender el procedimiento para ingresar los diferentes tipos de punto de monitoreo se describirá a continuación los puntos de monitoreo ingresados en esta modelación:

1. **Primer punto de monitoreo:** se ingresó este punto en la entrada del dominio con la siguiente expresión: `agua.massFlowAve(Velocity)@entrada` (Figura 107).
2. **Segundo punto de monitoreo:** se configuro en la salida del dominio, ya que constituye una parte importante a lo largo de la estructura. Al igual que el primer punto se encontró la velocidad promedio del área de salida utilizando la expresión: `agua.massFlowAve(Velocity)@Salida` (Figura 107).

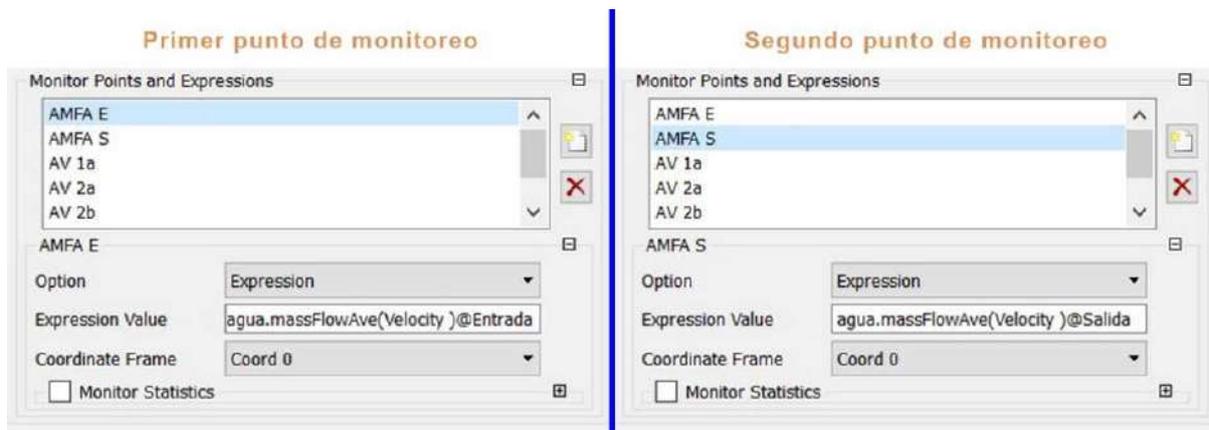


Figura 107. Primer y segundo punto de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

3. **Tercer punto de monitoreo:** se ubica donde se realizó el segundo aforo (Figura 67), a través de coordenadas cartesianas y se utilizó la función *Velocity* para la fase agua (Figura 108). Sus coordenadas son (131.765; 3.01825; 180.002).
4. **Cuarto punto de monitoreo:** se ingresó con la finalidad de monitorear la evolución de la velocidad de agua en el vertedero lateral. También se utilizó la función *Velocity* en la fase del agua y sus coordenadas son (191.5; 2.96805; 175.251).
5. **Quinto punto de monitoreo:** se encuentra en la ubicación del cuarto punto de monitoreo, con la única diferencia que se utilizó la función *Velocity W* en la fase del agua; registrando así la velocidad del agua solo en la dirección Z.
6. **Sexto punto de monitoreo:** se ubicó en el centro del área de salida, específicamente en las coordenadas (201.25; 0.3154; 170), con la función *Velocity* en la fase del agua. Se utilizó esta ubicación ya que se considera parte importante del dominio.
7. **Séptimo punto de monitoreo:** se encuentra en las mismas coordenadas del sexto punto de monitoreo, con la única diferencia que utiliza la variable *Velocity U* en la fase del agua. Esto quiere decir que medirá la velocidad del agua en la dirección X.

Al finalizar la creación de los puntos de monitoreo, el software nos muestra la ubicación de los puntos que se ingresaron en una ubicación específica. Para esto coloca un símbolo de color amarillo en las ubicaciones (Figura 109). Además, aparecen en el panel de configuración a la izquierda del área de trabajo.

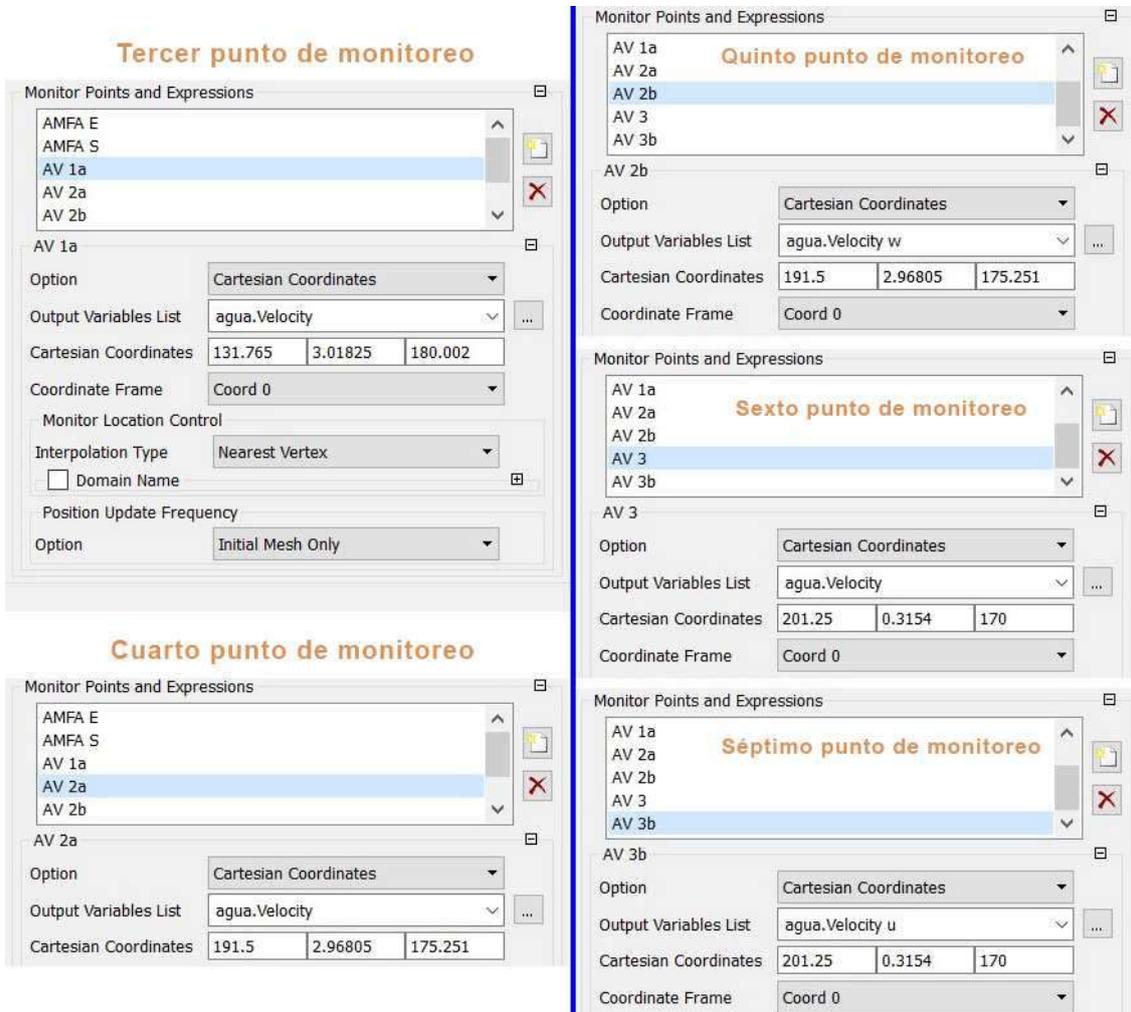


Figura 108. Puntos de monitoreo en coordenadas absolutas.

Fuente: Elaboración propia.

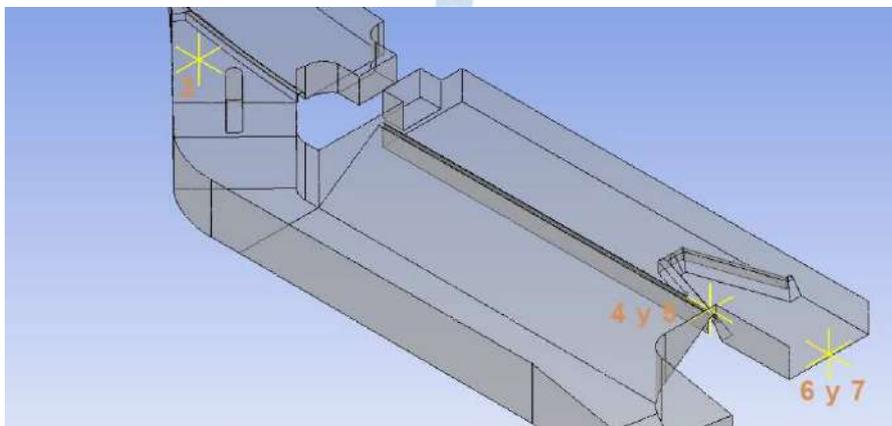


Figura 109. Ubicación de puntos de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

Cuando trabajamos análisis transitorios es necesario ingresar también las condiciones inicialización. Después de configurar el tipo de análisis el software nos pedirá ingresar estas condiciones para facilitar la convergencia del análisis; para esta modelación se ingresará una velocidad del fluido inicial en x, la cual ha sido calculada a partir del primer aforo y se tomó como 1.17 m/s (Figura 110).

Otro parámetro que se ingresara es la presión relativa o *Relative pressure*, descrita a través de la expresión *UpPres*. Además, la turbulencia se definirá como media con una intensidad de 5 %, la cual es muy usada en simulaciones de superficie libre. Finalmente, en las configuraciones de fluidos debemos ingresar el volumen de fracción con el que se iniciará, para el caso del agua se ingresará la expresión *UpVFWater* o fracción del volumen de agua aguas arriba. Por otro lado, para la fase aire se ingresará la expresión *UpVFAir* o la fracción del volumen de aire agua arriba; estas expresiones se describen en la Tabla 10.

Las condiciones de inicialización son de importancia esencial debido a que representan el punto de partida de la modelación y se representan las condiciones con las que partirá el flujo desde la cara de entrada. Para el caso de análisis estacionarios no es necesario definirlas ya que el software tomará los valores detallados en las condiciones de borde de entrada.

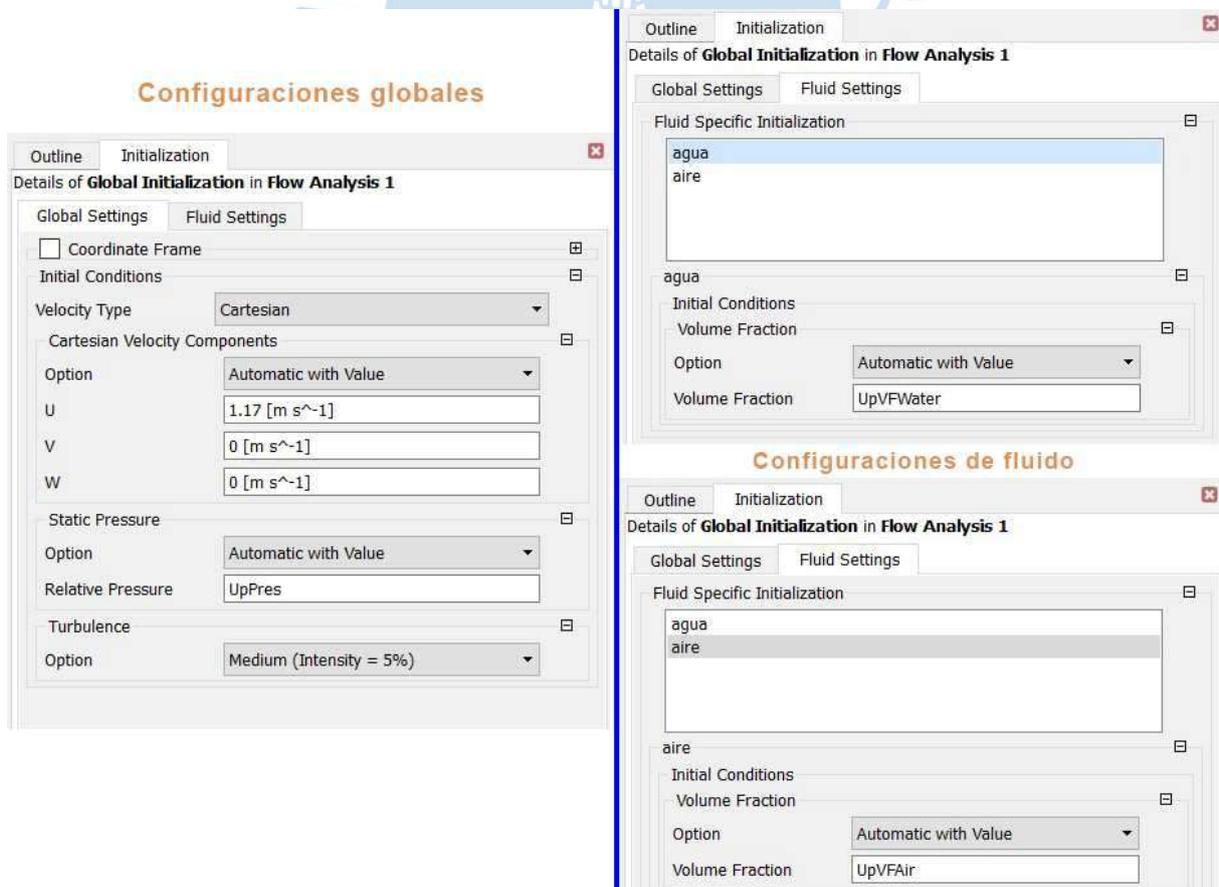


Figura 110. Condiciones de inicialización.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se colocarán las tablas resumen de la modelación (Tabla 16 y Tabla 17) que se obtienen en el CFX *Post* de manera automática.

Tabla 16. Resumen de parámetros físicos de condiciones de frontera – análisis transitorio.

Boundary - Entrada	
Type	INLET
Location	Entrada
Settings	
Flow Direction	Normal to Boundary Condition
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Bulk Mass Flow Rate
Mass Flow Rate	2.3480e+04 [kg s ⁻¹]
Turbulence	Intensity and Length Scale
Eddy Length Scale	UpH
Fractional Intensity	5.00E-02
Fluid	agua
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	UpVFWater
Fluid	aire
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	UpVFAir
Boundary – Superficie libre	
Type	OPENING
Location	Superficielibre
Settings	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Entrainment
Relative Pressure	0.0000e+00 [Pa]
Turbulence	Zero Gradient
Fluid	agua
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	0.00E+00
Fluid	aire
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	1.00E+00
Boundary - Salida	
Type	OUTLET
Location	Salida2
Settings	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Static Pressure
Relative Pressure	DownPres
Boundary - Fondo	
Type	WALL
Location	Fondo
Settings	
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Rough Wall
Sand Grain Roughness Height	3.6000e-01 [mm]
Boundary - Paredes	
Type	WALL
Location	Paredes
Settings	
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Rough Wall
Sand Grain Roughness Height	3.6000e-01 [mm]

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Resumen de parámetros físicos del dominio – análisis transitorio.

Domain - Default Domain	
Type	Fluid
Location	B317
Materials	
Water	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
Air at 25 C	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
Settings	
Buoyancy Model	Buoyant
Buoyancy Reference Density	Denref
Gravity X Component	0.0000e+00 [m s ⁻²]
Gravity Y Component	-9.8100e+00 [m s ⁻²]
Gravity Z Component	0.0000e+00 [m s ⁻²]
Buoyancy Reference Location	Automatic
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Homogeneous Model	Off
Turbulence Model	SST
Turbulent Wall Functions	Automatic

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.3. Análisis estacionario

En el acápite anterior se explicó detalladamente los parámetros físicos que se consideraron, además del procedimiento que se siguió. En esta parte no se profundizará en la colocación de los parámetros dado que son muy parecidos; solo se presentará la tabla resumen de la física del problema que se obtiene automáticamente del CFX *Post*. Cabe recalcar que las expresiones usadas en esta modelación se describen en la Tabla 10.

Para esta modelación se configuró un análisis del tipo estacionario como se muestra en la Figura 111, a diferencia del análisis transitorio no se ingresan parámetros adicionales.

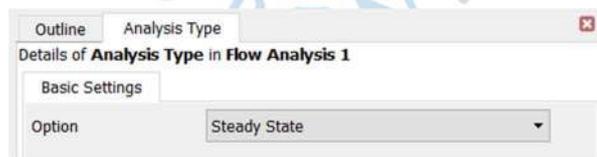


Figura 111. Configuración de tipo de análisis – estacionario.

Fuente: Elaboración propia.

Para el mallado se utilizó la herramienta *mesh adaption*, esta refina los elementos de la malla en el límite entre las fases o superficie libre. Inicialmente se utilizó una malla homogénea como se describe en el acápite 5.2.1.2, luego se procedió a ingresar la herramienta de malla adaptativa en el *Setup*. Para esto damos clic derecho en *Solver*, luego *Insert* y finalmente clic en *Mesh Adaption* como lo muestra la Figura 112. Finalmente, se procede a ingresar sus principales configuraciones (ANSYS. INC, CFX-Pre User's Guide, 2016):

- a. **Criterio de adaptación** (*Adaption criteria*): en esta ventana se selecciona la variable que se tomará como referencia para aplicar el refinamiento, en este caso seleccionamos el volumen de fracción para la fase aire. El número máximo de *steps* le indica al software el número de pasos que realizará la adaptación; para esta modelación se consideró 2 refinamientos y es recomendable configurar entre 1 a 5. Finalmente, el número de nodos en la malla final generado por el proceso de adaptación se controla mediante la opción *Multiple of Initial Mesh*. Para esta modelación se realizó un refinamiento respecto a la malla inicial con un factor de nodo de 3, este factor indica el múltiplo aproximado de nodos de la nueva malla respecto a la malla del paso anterior (Figura 112).
- b. **Criterio de convergencia de adaptación** (*Adaption convergence criteria*): en esta parte de la ventana se indica el número máximo de iteraciones por cada paso de la adaptación. Para esta modelación se consideró 350 iteración, es decir se produjo los refinamientos cada 350 iteraciones. Otro factor que se configura es el RMS o residual promedio cuyo significado ya se ha explicado anteriormente, considerándose de 10^{-4} .

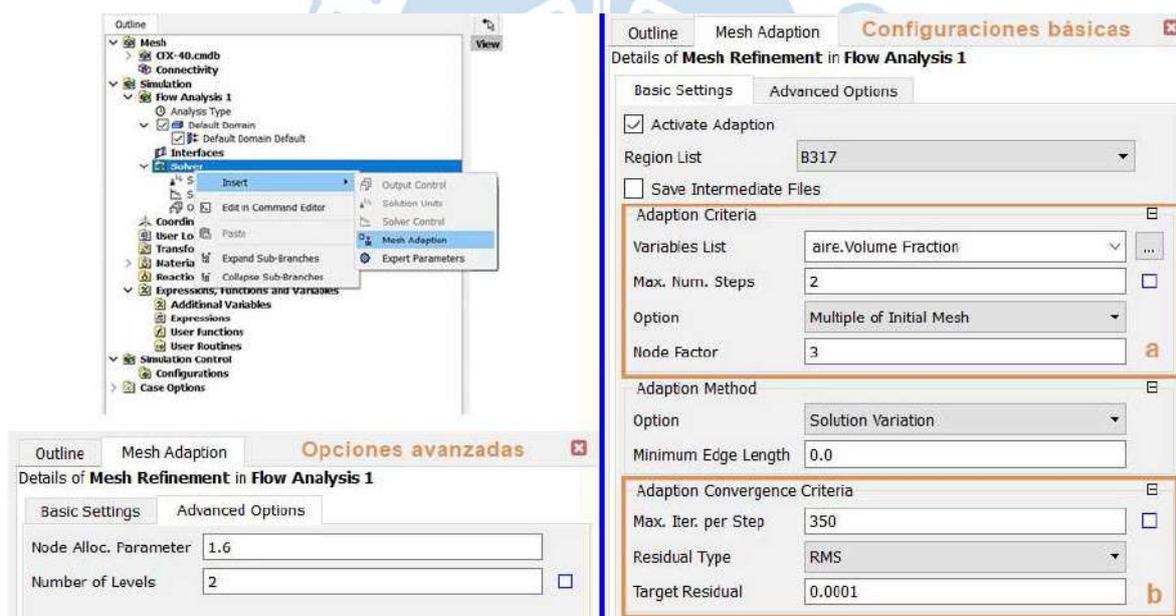


Figura 112. Adaptación de malla.

Fuente: Elaboración propia.

Otro parte que cambia respecto al análisis transitorio son los controles de convergencia del *Solver Control* en la pestaña de configuraciones básicas como se indica en la Figura 113. Para un análisis estacionario es necesario indicar el número mínimo y máximo de iteraciones, para esta modelación se configuro como 500 y 3000 (Figura 113). Esto le indica al programa que si cumple los criterios de convergencia antes de las 500 iteraciones aún debe continuar hasta esta iteración y si por otro lado aún no alcanza la convergencia llegadas las 3000 iteraciones igual se detendrá la modelación en la iteración 3000. Finalmente, el último

parámetro a especificar es el *Timescale control*. Para esta modelación lo precisamos como *auto timescale* esto quiere decir que el software elegirá el valor automáticamente para cada iteración.

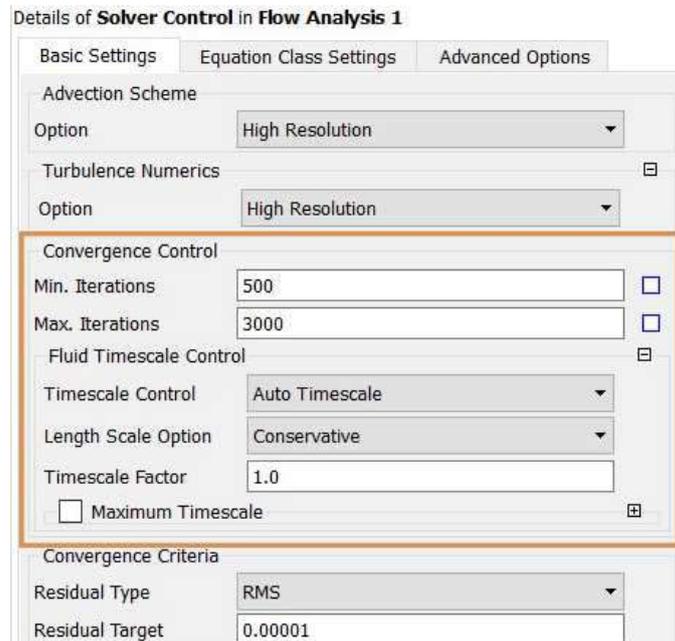


Figura 113. Controles de convergencia en análisis estacionario.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se detallará el resumen de la modelación en la Tabla 18 y Tabla 19 que se obtienen en el CFX *Post* de manera automática. Esta modelación tiene también los mismos puntos de monitoreo que el análisis transitorio, por esta razón no los detallamos.

Tabla 18. Resumen de parámetros físicos del dominio – análisis estacionario.

Domain - Default Domain	
<i>Type</i>	Fluid
<i>Location</i>	B317
Materials	
<i>Water</i>	
<i>Fluid Definition</i>	Material Library
<i>Morphology</i>	Continuous Fluid
<i>Air at 25 C</i>	
<i>Fluid Definition</i>	Material Library
<i>Morphology</i>	Continuous Fluid
Settings	
<i>Buoyancy Model</i>	Buoyant
<i>Buoyancy Reference Density</i>	Denref
<i>Gravity X Component</i>	0.0000e+00 [m s ⁻²]
<i>Gravity Y Component</i>	-9.8100e+00 [m s ⁻²]
<i>Gravity Z Component</i>	0.0000e+00 [m s ⁻²]
<i>Buoyancy Reference Location</i>	Automatic
<i>Domain Motion</i>	Stationary
<i>Reference Pressure</i>	1.0000e+00 [atm]
<i>Heat Transfer Model</i>	Isothermal
<i>Fluid Temperature</i>	2.5000e+01 [C]
<i>Homogeneous Model</i>	On
<i>Turbulence Model</i>	k epsilon
<i>Turbulent Wall Functions</i>	Scalable

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Resumen de parámetros físicos de condiciones de frontera – análisis estacionario.

Boundary - Entrada	
Type	INLET
Location	Entrada
Settings	
Flow Direction	Normal to Boundary Condition
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Bulk Mass Flow Rate
Mass Flow Rate	2.3480e+04 [kg s ⁻¹]
Turbulence	Intensity and Length Scale
Eddy Length Scale	UpH
Fractional Intensity	5.00E-02
Fluid	agua
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	UpVFWater
Fluid	aire
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	UpVFAir
Boundary – Superficie libre	
Type	OPENING
Location	Superficielibre
Settings	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Entrainment
Relative Pressure	0.0000e+00 [Pa]
Turbulence	Zero Gradient
Fluid	agua
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	0.00E+00
Fluid	aire
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	1.00E+00
Boundary - Salida	
Type	OUTLET
Location	Salida2
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Static Pressure
Relative Pressure	DownPres
Boundary - Fondo	
Type	WALL
Location	Fondo
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Rough Wall
Sand Grain Roughness Height	3.6000e-01 [mm]
Boundary - Paredes	
Type	WALL
Location	Paredes
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Rough Wall
Sand Grain Roughness Height	3.6000e-01 [mm]

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3. Calcular la solución

El complemento *Solution* resuelve los sistemas de ecuaciones planteados mediante iteraciones consecutivas. Se llega a una solución cuando se han cumplido los criterios de

convergencia y se han alcanzado condiciones estables del apartado 2.2.9; nos muestra la evolución de parámetros como RMS promedio o residuales promedios, imbalances y puntos de monitoreo de iteración en iteración. Cabe precisar que los valores de residuales se obtienen debido al error de cierre, porque no se obtiene una única solución para el sistema de ecuaciones.

El primer paso para ejecutar el complemento *Solution* es dar clic derecho en *Solution* desde la ventana del *Workbench* como se muestra en la Figura 114, luego clic en *Edit*. Se abrirá la ventana que se muestra en la Figura 115.

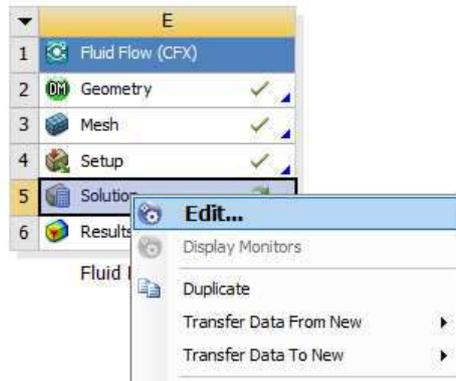


Figura 114. Opciones de la herramienta *Solution*.

Fuente: Elaboración propia.

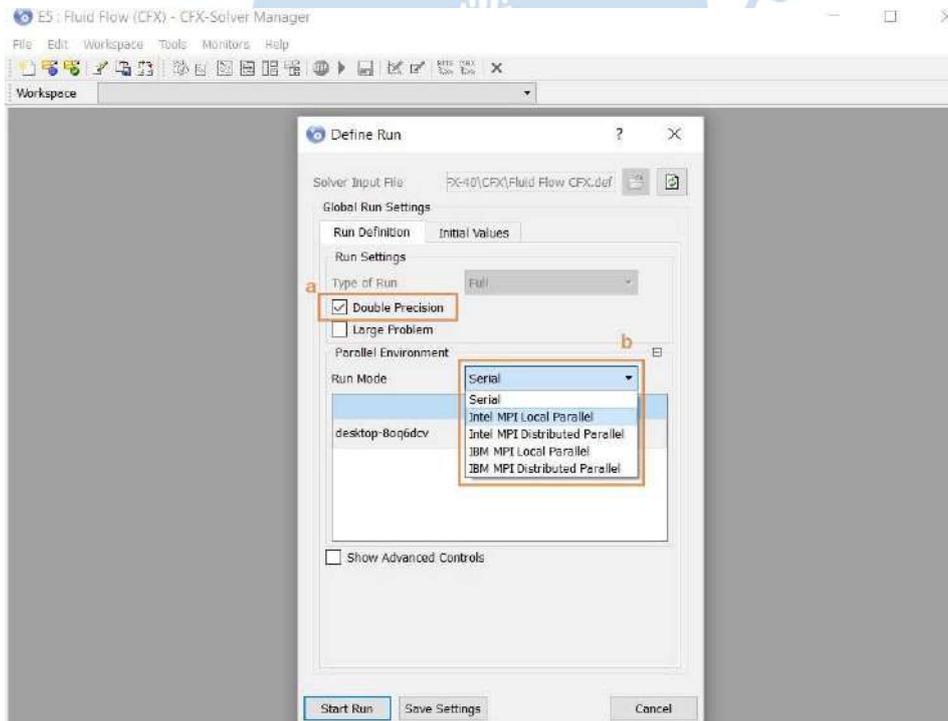


Figura 115. Vista preliminar *Solution*.

Fuente: Elaboración propia.

Después se abrirá la ventana de *Define Run* (Figura 115), aquí se definirá algunas opciones que pueden mejorar la precisión y reducir el tiempo de ejecución de la simulación principalmente son:

- a. Doble precisión (*Double precision*): al seleccionar esta opción, el *Solver* ejecuta dos veces la solución de cualquier iteración. Esta acción mejora los resultados de la modelación, pero aumenta el tiempo de ejecución. Es preciso tener en cuenta esto para decidir en qué modelación usar esta opción (ANSYS. INC, CFX Solver Manager User's Guide, 2015).
- b. Modo de corrida (*Run mode*): existen principalmente dos modos de ejecutar una simulación *Serial* y *Intel MPI Local Parallel*. La opción *Serial* realiza la ejecución en serie, esto quiere decir que el software ira utilizando los procesadores virtuales uno después de otro. Sin embargo, la opción *Intel MPI Local Parallel* utiliza los procesadores virtuales en paralelo mejorando el tiempo de ejecución de la modelación. Al elegir esta opción es necesario saber cuántos procesadores utilizar o podríamos dañar el computador (Arteaga, 2017).

Para esta modelación no se utilizó la opción de doble precisión y además se ejecutó el *Solver* con 4 de los 8 procesadores virtuales del computador en paralelo. Al iniciar el procesamiento se da clic en *Start Run* y se abrirá la ventana del solucionador que se presenta en la Figura 116.

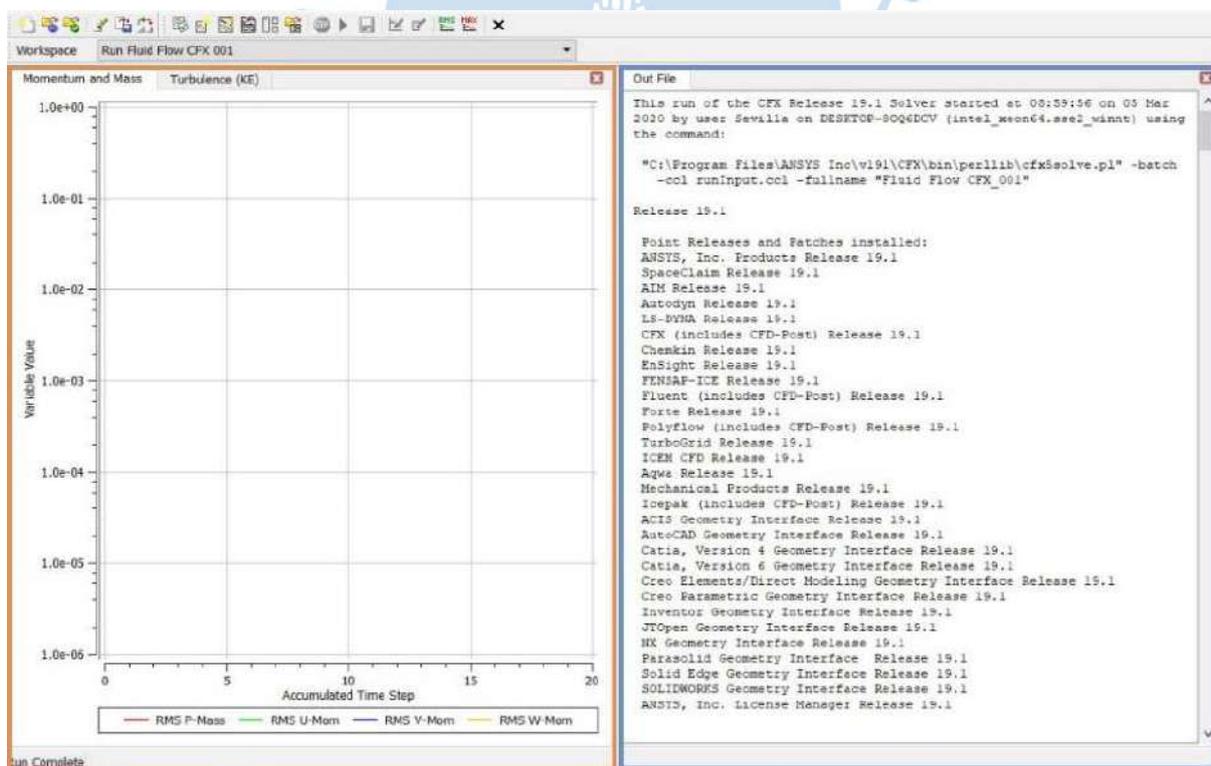


Figura 116. Zonas del solucionador de ANSYS CFX.

Fuente: Elaboración propia.

La primera zona (naranja) en la parte izquierda de la Figura 116 presenta el progreso de los valores de residuales para las ecuaciones de Momentum y Masa, y Turbulencia (KE). Cabe

destacar que se muestran los valores de los puntos de monitoreo ingresados en el *Setup*. En esta zona se puede ingresar también nuevas pestañas para monitorear otras variables en la modelación como es la evolución de los imbalances, siguiendo el procedimiento que se muestra en la Figura 117.

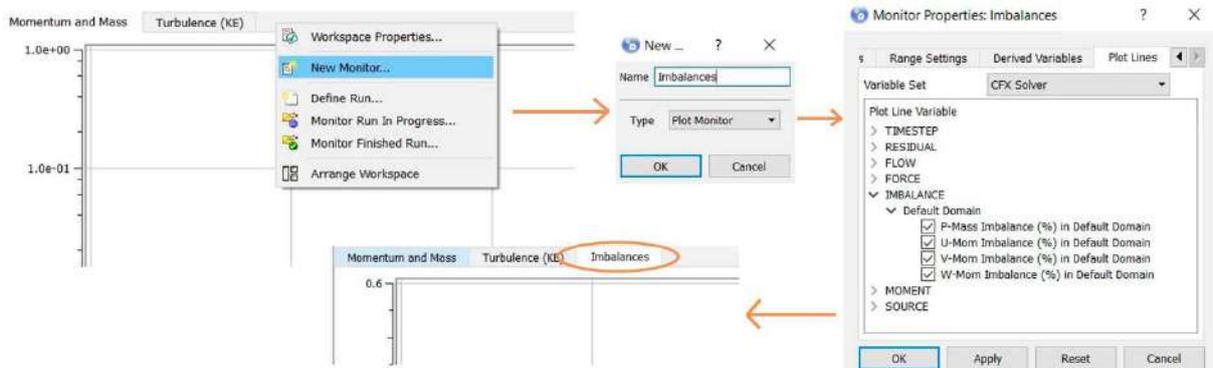


Figura 117. Creación de nuevas ventanas de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en la segunda zona (azul) muestra los valores exactos de los residuales, iteración en iteración y algunos valores de propiedades del flujo como el número de Froude. Para el mallado adaptativo se muestra también las características del mallado realizado por el programa. A continuación, se explicará los gráficos de convergencia obtenidos.

5.2.3.1. Análisis transitorio

Todos los gráficos obtenidos del solucionador cumplieron los parámetros detallados en el acápite 2.2.9 y se muestran en las Figura 118, Figura 119, Figura 120 y Figura 121.

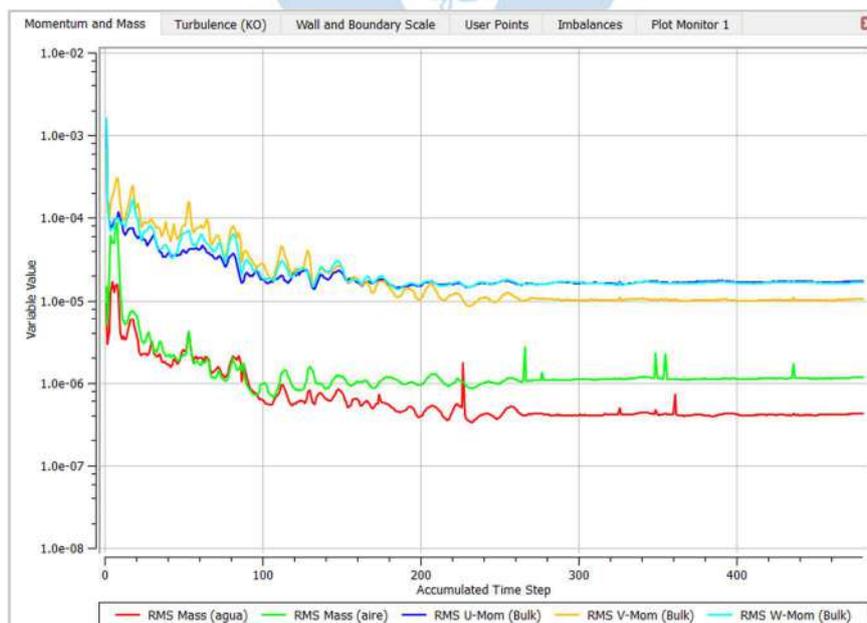


Figura 118. Residuales promedios de análisis transitorio.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 118 se muestra la evolución de los residuales promedio de todos los volúmenes finitos, todas las variables han alcanzado valores menores a 10^{-4} y muy cercanos a 10^{-5} ; con estos valores se considera que la convergencia es buena. Además, se puede ver de la Figura 119 que los residuales de turbulencia también son menores a 10^{-4} y han alcanzado una cierta estabilidad.

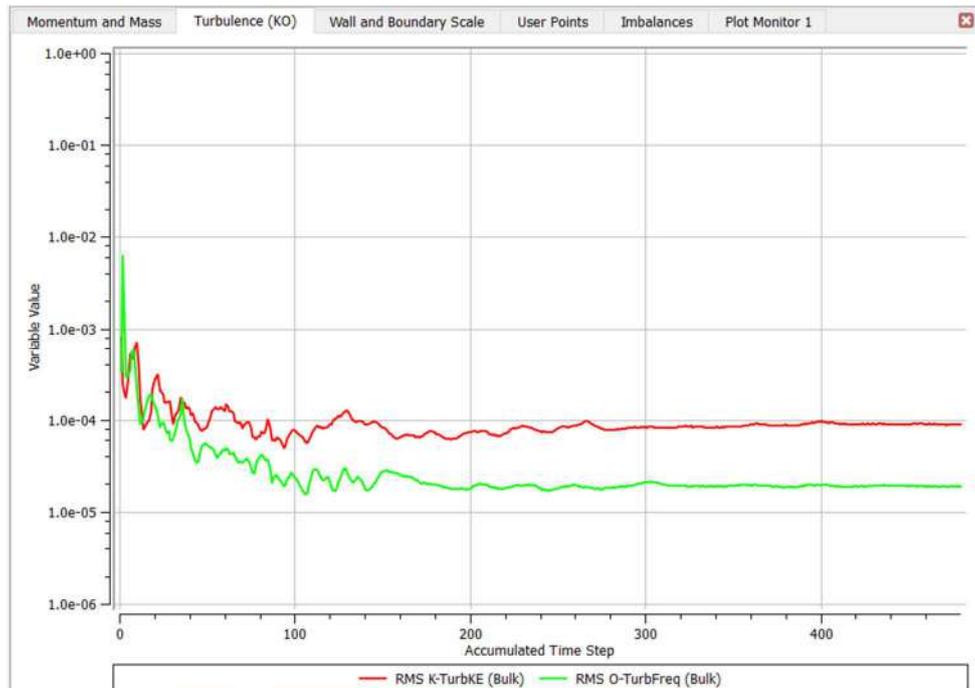


Figura 119. Turbulencia de análisis transitorio.

Fuente: Elaboración propia.

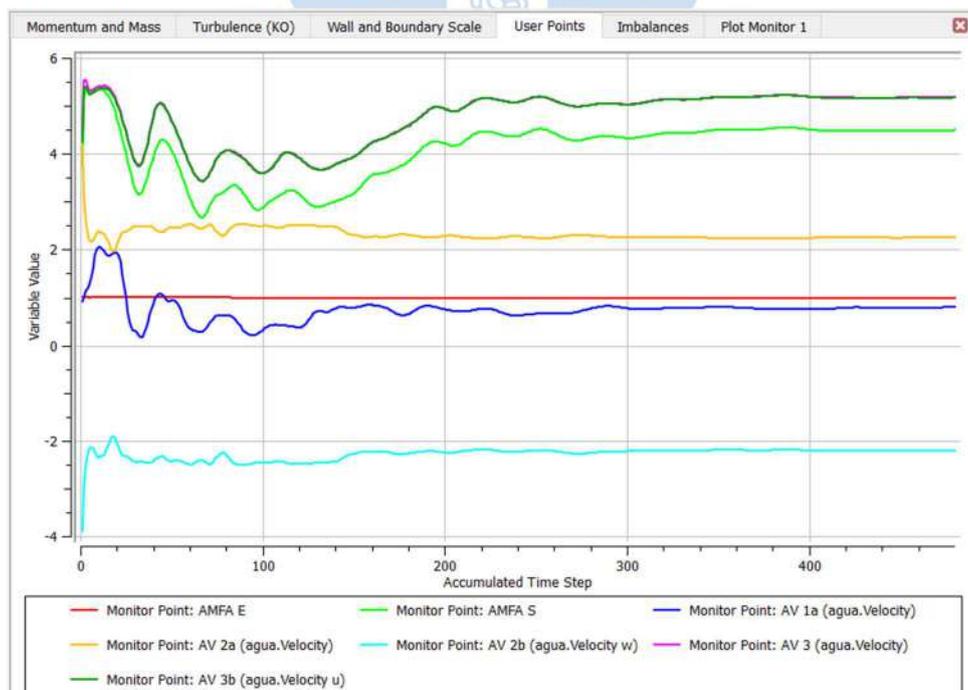


Figura 120. Puntos de monitoreo de análisis transitorio.

Fuente: Elaboración propia.

Otro factor importante son los puntos de monitoreo que se muestran en la Figura 120; se deduce que han alcanzado la convergencia ya que sus valores se muestran constantes en las últimas iteraciones. Cabe destacar que al ser un análisis transitorio la modelación se detendrá cuando ha alcanzado su número total de *timestep* acumulado, estos se calculan con la razón entre la duración total y el *timestep*. Se asignó una duración total o tiempo total de 240 s y un *timestep* de 0.5 s, entonces tendremos un total de 480 *timestep* acumulados. Por esta razón todas las gráficas se muestran detenidas en este paso de tiempo.

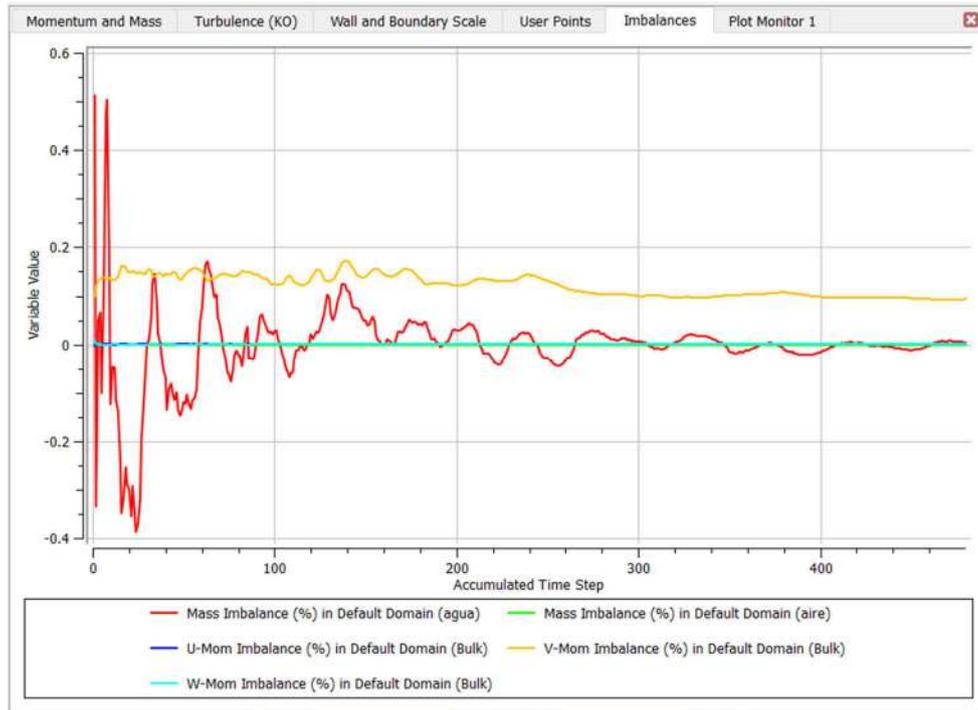


Figura 121. Imbalances de análisis transitorio.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 121 se muestran los imbalances de la modelación y presentan valores de conservación menores al 1%. Así la modelación ha cumplido con todos los parámetros de convergencia por lo que se puede considerar que la modelación es numéricamente correcta.

Otros datos importantes que genera el *Solver* se presentan en la parte derecha de la ventana de trabajo (Figura 116). Detalla los valores de las propiedades y características del flujo obtenidas al final de la convergencia, estadísticas de mado, valores de puntos de monitoreo y el valor exacto de los residuales para cada iteración que va realizando el software como se muestra en la Figura 122.

Para el caso de análisis transitorios los datos se generan por cada *timestep* acumulado y el *Solver* muestra los residuales desde el primer al último *Loop* que requiere cada *timestep*. También, se muestra los datos estadísticos de la malla inicial (Figura 122) y las nuevas mallas

cuando se utiliza la herramienta de mallado adaptativa. Al finalizar se detalla el tiempo de total de simulación, para esta modelación al software la tomó 9 horas y 37 minutos.

Mesh Statistics					Average Scale Information		
Domain Name : Default Domain					Domain Name : Default Domain		
Total Number of Nodes	=	371852			Global Length	= 2.3369E+01	
Total Number of Elements	=	1983461			Minimum Extent	= 1.1677E+01	
Total Number of Tetrahedrons	=	1983461			Maximum Extent	= 1.7423E+02	
Total Number of Faces	=	153456			aire.Density	= 1.1850E+00	
COEFFICIENT LOOP ITERATION = 3 CPU SECONDS = 2.428E+02					aire.Dynamic Viscosity	= 1.8310E-05	
Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	aire.Velocity	= 1.0664E+00	
U-Mom-Bulk	0.73	2.1E-05	1.3E-03	5.8E-03 OK	aire.Advection Time	= 2.1913E+01	
V-Mom-Bulk	0.89	3.5E-05	1.0E-03	1.7E-03 OK	aire.RMS Courant Number	= 3.7074E+00	
W-Mom-Bulk	0.61	2.1E-05	1.2E-03	5.9E-03 OK	aire.Maximum Courant Number	= 4.5339E+01	
Mass-aire	0.45	3.0E-06	1.3E-04	7.1E-04 OK	aire.Reynolds Number	= 1.6132E+06	
Mass-agua	0.60	1.4E-06	4.4E-05	19.6 9.3E-03 OK	aire.Mass (Conservative)	= 3.1250E+03	
					aire.Mass (Normalised)	= 3.1250E+03	
					aire.Volume	= 2.6372E+03	
					aire.Volume Fraction	= 2.0668E-01	
					agua.Density	= 9.9700E+02	
					agua.Dynamic Viscosity	= 8.8990E-04	
					agua.Velocity	= 1.0664E+00	
					agua.Advection Time	= 2.1913E+01	
					agua.RMS Courant Number	= 3.4119E+00	
					agua.Maximum Courant Number	= 7.0484E+01	
					agua.Reynolds Number	= 2.7820E+07	
					agua.Mass (Conservative)	= 1.0094E+07	
					agua.Mass (Normalised)	= 1.0094E+07	
					agua.Volume	= 1.0124E+04	
					agua.Volume Fraction	= 7.9335E-01	
					Wave Speed	= 1.5141E+01	
					Frude Number	= 7.0434E-02	
Job Information at End of Run					Variable Range Information		
Job Finished: Thu Jan 2 20:20:15 2020					Variable Name	min	max
Total wall clock time: 3.464E+04 seconds					aire.Density	1.18E+00	1.18E+00
or: 0: 9: 37: 15.574)					aire.Dynamic Viscosity	1.83E-05	1.83E-05
(Days: Hours: Minutes: Seconds)					agua.Density	9.97E+02	9.97E+02
					agua.Dynamic Viscosity	8.90E-04	8.90E-04
					agua.Velocity u	-2.78E+00	5.67E+00
					agua.Velocity v	-6.24E+00	4.77E+00
					agua.Velocity w	-5.11E+00	2.42E+00
					Pressure	-4.12E+03	1.07E+05
					aire.Conservative Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
					agua.Conservative Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
					aire.Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
					agua.Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
					agua.Turbulence Kinetic Energy	5.02E-09	2.87E+00
					agua.Turbulence Eddy Frequency	2.11E-03	1.81E+02

Figura 122. Parámetros mostrados en el Solver – Análisis transitorio.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que todos los gráficos y tablas que se muestran en el complemento *Solution*, se obtienen cuando se han cumplido los criterios de convergencia configurados en el *Solver control* del complemento *Setup*. Es decir, cuando se ha alcanzado el residual promedio indicado o se ha llegado al número máximo de iteraciones. Para finalizar esta parte se verifica que en la ventana del *Workbench* el complemento *Solution* tenga un check, verificando así que la solución es correcta.

5.2.3.2. Análisis estacionario

Todos los gráficos obtenidos del solucionador cumplieron los parámetros detallados en el acápite 2.2.9 y se muestran en la Figura 123, Figura 124 y Figura 125. Existen dos cambios muy marcados en las iteraciones 350 y 700, producidos por los refinamientos de la malla en la superficie libre. Cuando se produce el refinamiento automático del software se reinician en cierta medida los valores de los residuales promedios, turbulencia, puntos de monitoreo e imbalances; y luego conforme se desarrolla la modelación alcanzan estabilidad.

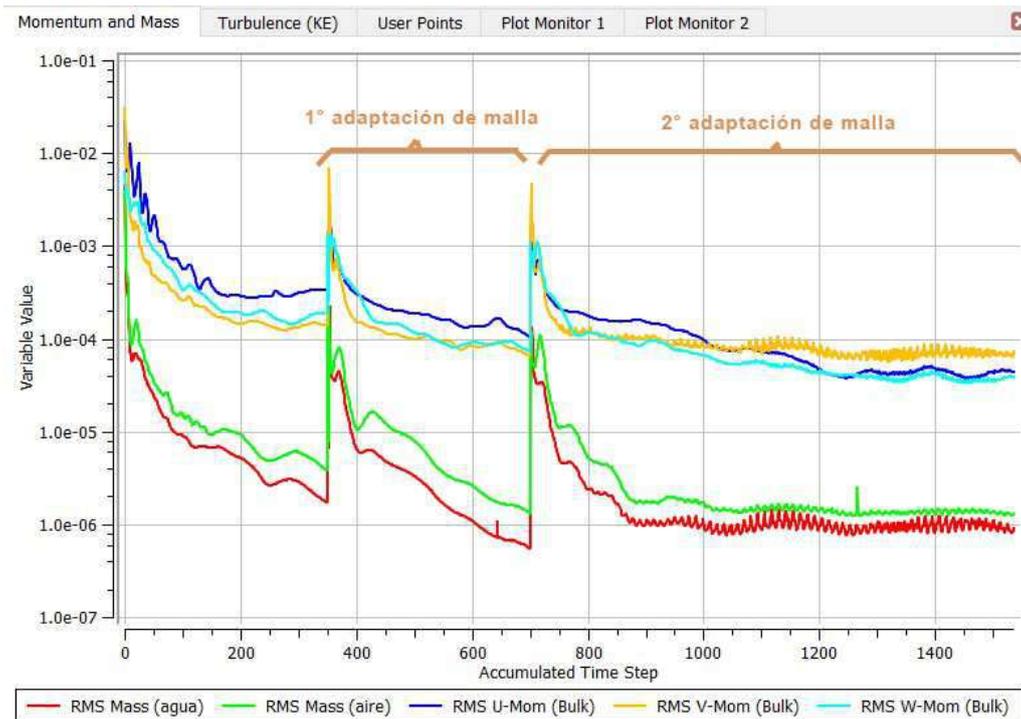


Figura 123. Residuales promedio de análisis estacionario.

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 123, los residuales promedio tienen valores menores a 10^{-4} , por esto se considera que poseen una convergencia aceptable. Los siete puntos de monitoreo colocados en el dominio, cuya notación y formulación es presentada en la leyenda debajo del área de trabajo, presentan valores estables desde la iteración 800 (Figura 124).

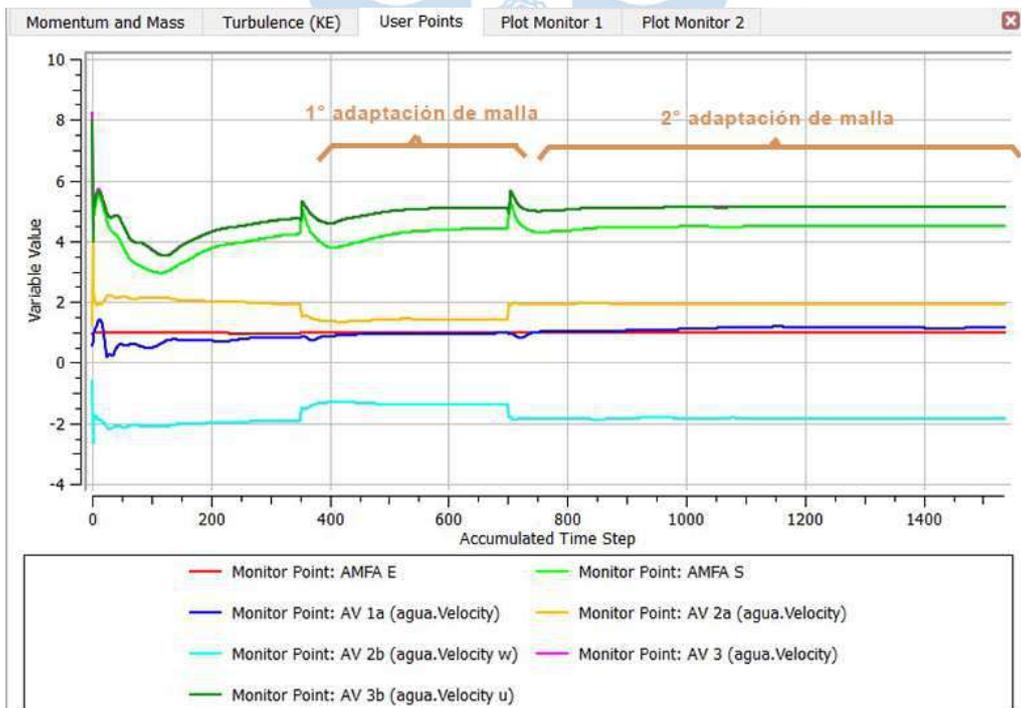


Figura 124. Puntos de monitoreo de análisis estacionario.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los imbalances en este análisis estacionario presentan la tendencia que se muestra en la Figura 125. Desde la iteración 1000, todos presentan valores cercanos a 0, lo que indica una buena conservación de los parámetros dentro de la modelación.

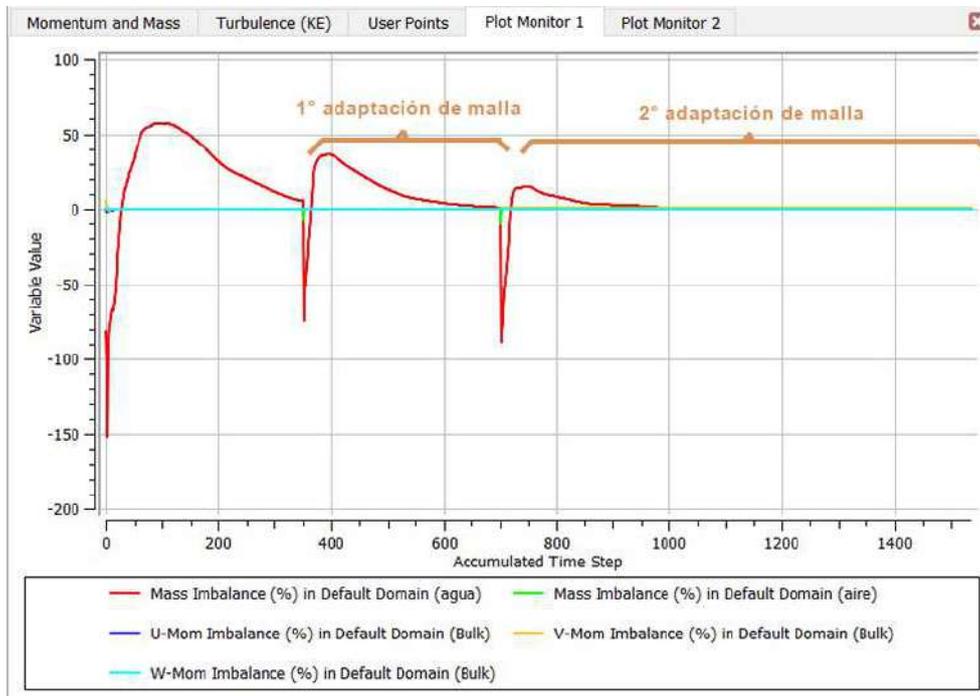


Figura 125. Imbalances de análisis estacionario.

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar mejor los imbalances en las iteraciones finales, el software nos ofrece la opción de visualizar en la gráfica los imbalances para las iteraciones más recientes en cierto rango de valores. Primero damos un clic derecho en el área del gráfico, luego en *Monitor Properties* (Figura 126). Se selecciona la opción *Most Recent* y se indica el número de iteraciones que el software mostrara. Finalmente, clic en aplicar. Para nuestra modelación se configuro que se muestre las ultimas 100 iteraciones (Figura 127). Se concluye también que presentan valores menores al 1% lo que indica que la modelación cumple con este criterio.

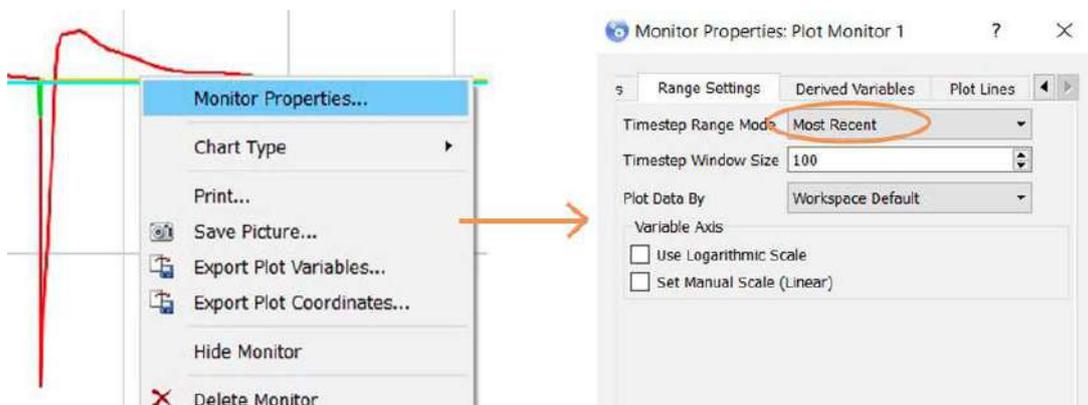


Figura 126. Procedimiento para visualizar ultimas iteraciones.

Fuente: Elaboración propia.

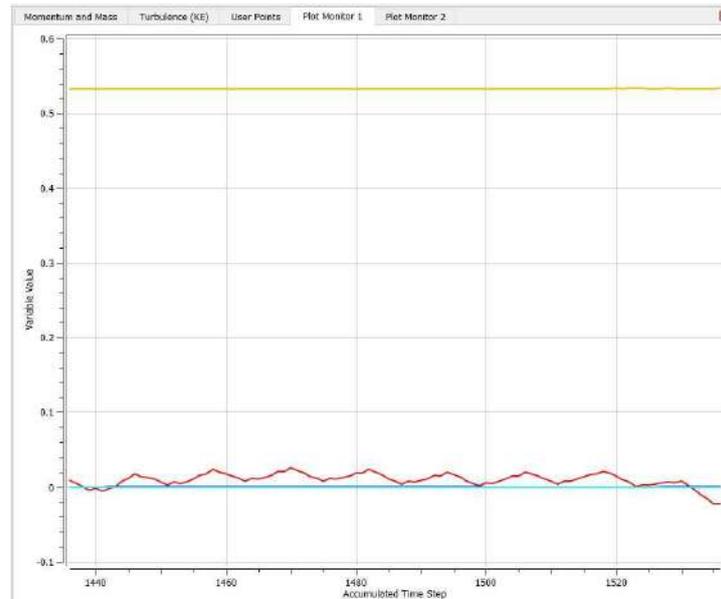


Figura 127. Imbalances en las últimas 100 iteraciones.

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente en la parte derecha del área de gráficos se muestran los datos detallados en la Figura 128. Se verificó también que en el *Workbench* el complemento *Solution* tenga el check que indica la conformidad de la solución. Además, al cumplir todos los criterios de convergencia se considera que la modelación es numéricamente correcta.

Mesh Statistics					Average Scale Information	
Domain Name : Default Domain					Domain Name : Default Domain	
Total Number of Nodes	-	490729		Global Length	=	2.3376E+01
Total Number of Elements	-	2519379		Minimum Extent	=	1.1677E+01
Total Number of Tetrahedrons	-	2519379		Maximum Extent	=	1.7423E+02
Total Number of Faces	-	81566		aire.Density	=	1.1850E+00
				aire.Dynamic Viscosity	=	1.8310E-05
				aire.Velocity	=	1.0884E+00
				aire.Advection Time	=	2.1472E+01
				aire.Reynolds Number	=	1.6462E+06
				aire.Mass (Conservative)	=	3.0716E+03
				aire.Mass (Normalised)	=	3.0716E+03
				aire.Volume	=	2.5521E+03
				aire.Volume Fraction	=	2.0309E-01
				agua.Density	=	9.9700E+02
				agua.Dynamic Viscosity	=	8.8990E-04
				agua.Velocity	=	1.0884E+00
				agua.Advection Time	=	2.1472E+01
				agua.Reynolds Number	=	2.8497E+07
				agua.Mass (Conservative)	=	1.0141E+07
				agua.Mass (Normalised)	=	1.0141E+07
				agua.Volume	=	1.0171E+04
				agua.Volume Fraction	=	7.9691E-01
				Wave Speed	=	1.5141E+01
				Froude Number	=	7.1883E-02
OUTER LOOP ITERATION = 831 (2) CPU SECONDS = 7.427E+04 (2.193E-02)					Variable Range Information	
Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	Domain Name : Default Domain	
U-Mom-Bulk	1.00	1.6E-04	4.7E-03	1.5E-04 OK	Variable Name	min max
V-Mom-Bulk	0.93	1.0E-04	1.4E-02	9.7E-04 OK	aire.Density	1.18E+00 1.18E+00
W-Mom-Bulk	0.99	1.1E-04	4.1E-03	2.5E-04 OK	aire.Specific Heat Capacity at Constant Pre	1.00E+03 1.00E+03
Mass-aire	0.99	4.4E-06	2.4E-04	3.1E-03 OK	aire.Dynamic Viscosity	1.83E-05 1.83E-05
Mass-agua	0.99	2.2E-06	2.0E-04	19.9 9.9E-03 OK	aire.Thermal Conductivity	2.61E-02 2.61E-02
					aire.Static Entropy	0.00E+00 0.00E+00
					agua.Density	9.97E+02 9.97E+02
					agua.Specific Heat Capacity at Constant Pre	4.18E+03 4.18E+03
					agua.Dynamic Viscosity	8.90E-04 8.90E-04
					agua.Thermal Conductivity	6.07E-01 6.07E-01
					agua.Static Entropy	0.00E+00 0.00E+00
					agua.Velocity u	-2.81E+00 5.83E+00
					agua.Velocity v	-8.53E+00 5.37E+00
					agua.Velocity w	-5.50E+00 2.39E+00
					Pressure	-1.96E+03 1.07E+05
Job Information at End of Run						
Job finished: Sat Dec 28 14:45:26 2019						
Total wall clock time: 1.757E+04 seconds						
or: 0: 4: 52: 45.160)						
Days: Hours: Minutes: Seconds)						

Figura 128. Parámetros mostrados en el *Solver* – Análisis estacionario.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4. Visualización y análisis de los resultados

En este acápite se detallará el procedimiento para extraer los resultados del complemento *Results* del paquete computacional ANSYS CFX y se comparará los resultados obtenidos en los aforos, el análisis transitorio y el estacionario. El principal objetivo de esta modelación es obtener el caudal de entrada a la rápida hidráulica, por esta razón se realizará una comparación de velocidades de flujo y tirantes con respecto a los datos obtenidos de los aforos. Para obtener los tirantes y velocidades se procede a abrir el complemento *Results* desde el *Workbench* siguiendo el procedimiento de la Figura 129. Luego clic en *Edit*.

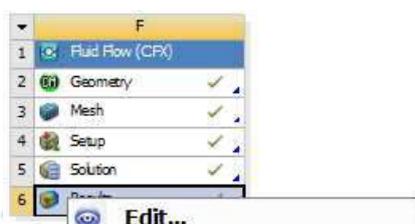


Figura 129. Opciones de la herramienta *Results*.

Fuente: Elaboración propia.

Se abrirá el complemento de *Results* cuya distribución se muestra en la Figura 130. Aquí se pueden generar entidades geométricas como puntos, líneas, planos, poli líneas y grupos de superficies; que servirán para extraer valores de variables físicas. Para este análisis se generará contornos para medir el tirante y la velocidad del agua en diferentes puntos.

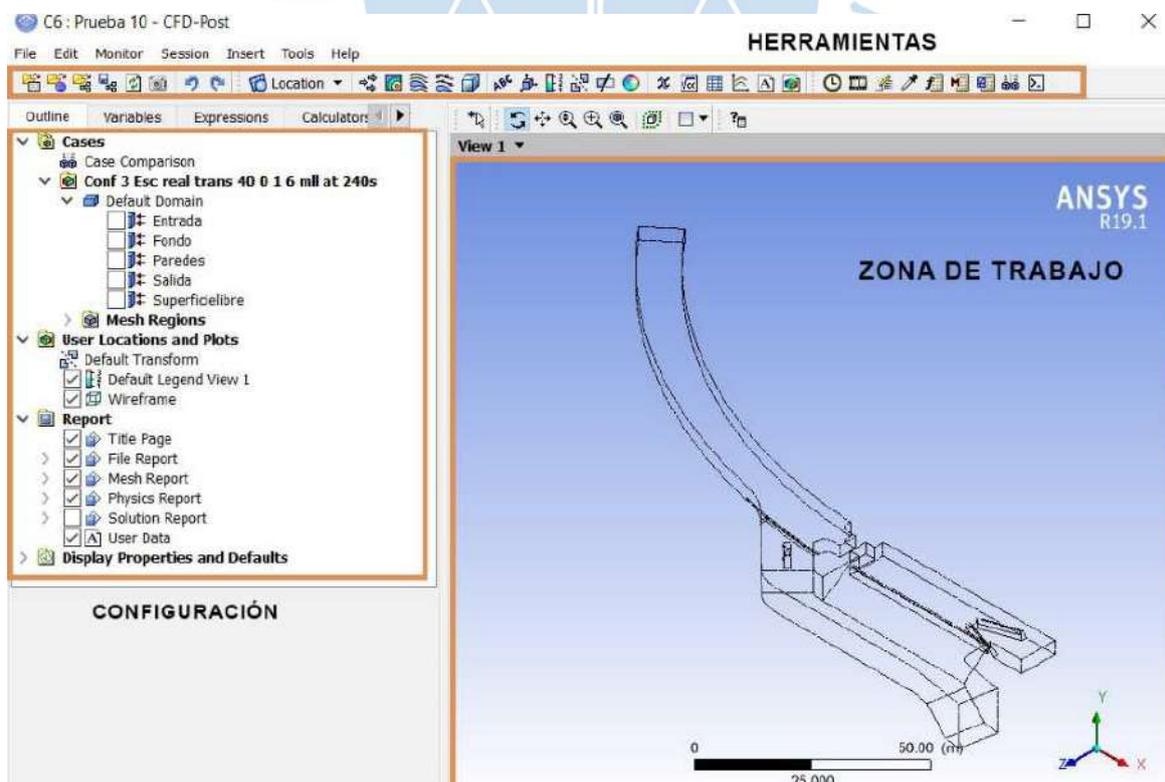


Figura 130. Vista preliminar complemento *Results*.

Fuente: Elaboración propia.

El primer paso es generar los planos donde se crearán los contornos, cabe destacar que se puede generar contornos en las ubicaciones donde se asignó alguna condición de frontera. El primer contorno se creará en la ubicación donde se realizó el segundo aforo y para su creación utilizaremos coordenadas cartesianas absolutas; y el ultimo contorno se generará en la Salida.

Para la creación de los planos hacemos clic en *Location* dentro del menú de herramientas, luego clic en *Plane* como se muestra en la Figura 131. Siguiendo este proceso se genera el Plano usando tres puntos en el espacio detallados en coordenadas absolutas (Figura 131), su ubicación se muestra en la Figura 132.

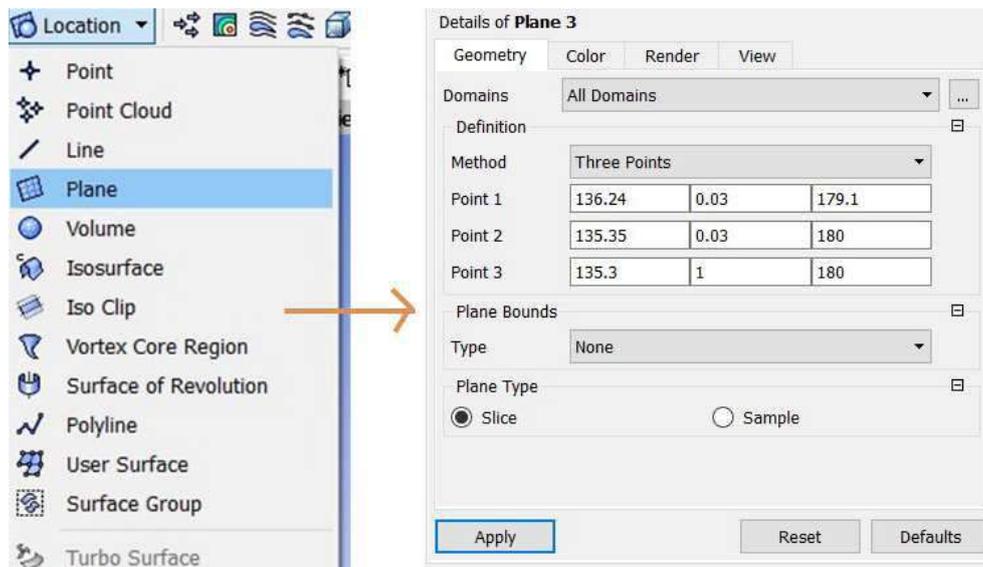


Figura 131. Planos de referencia para contornos.

Fuente: Elaboración propia.

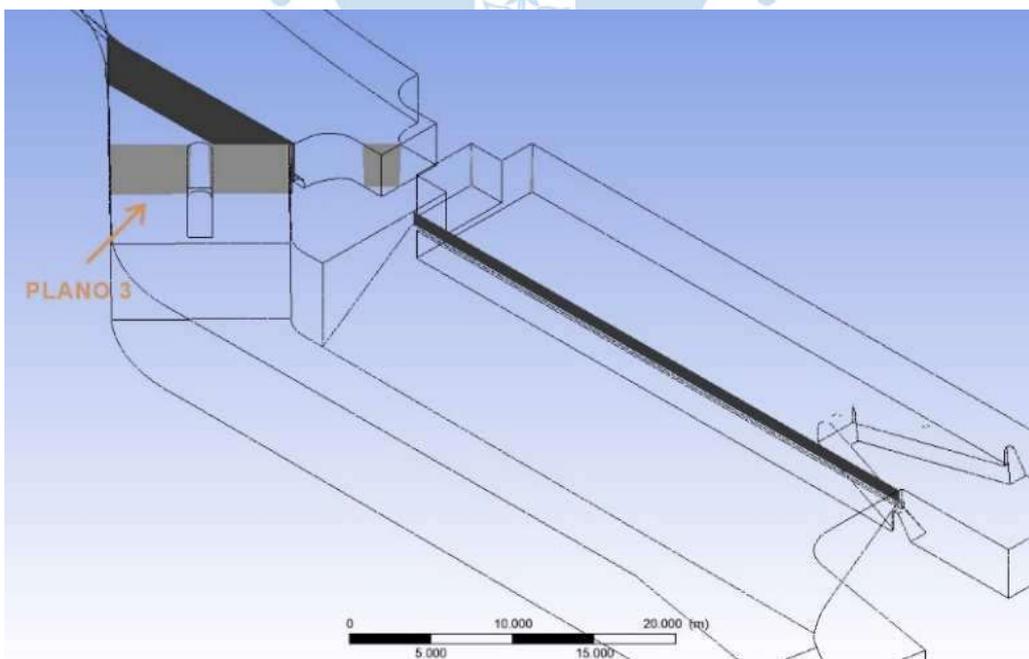


Figura 132. Ubicación de planos en dominio.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a crear contornos en los planos con la configuración que se muestra en la Figura 133. Primero vamos a la herramienta *Contour* en el menú *Insert* y asignamos la ubicación del contorno, para esta modelación el primer contorno se creará en la cara de Salida y el tercer contorno en el plano 3 creado anteriormente. Como variable utilizaremos el volumen de fracción de agua para identificar visualmente la ubicación aproximada de la superficie libre y se puede modificar el número de contornos para mejorar la visualización. Las configuraciones se asignan por defecto y clic en *Apply* (Figura 134).



Figura 133. Configuración de contornos creados.

Fuente: Elaboración propia.

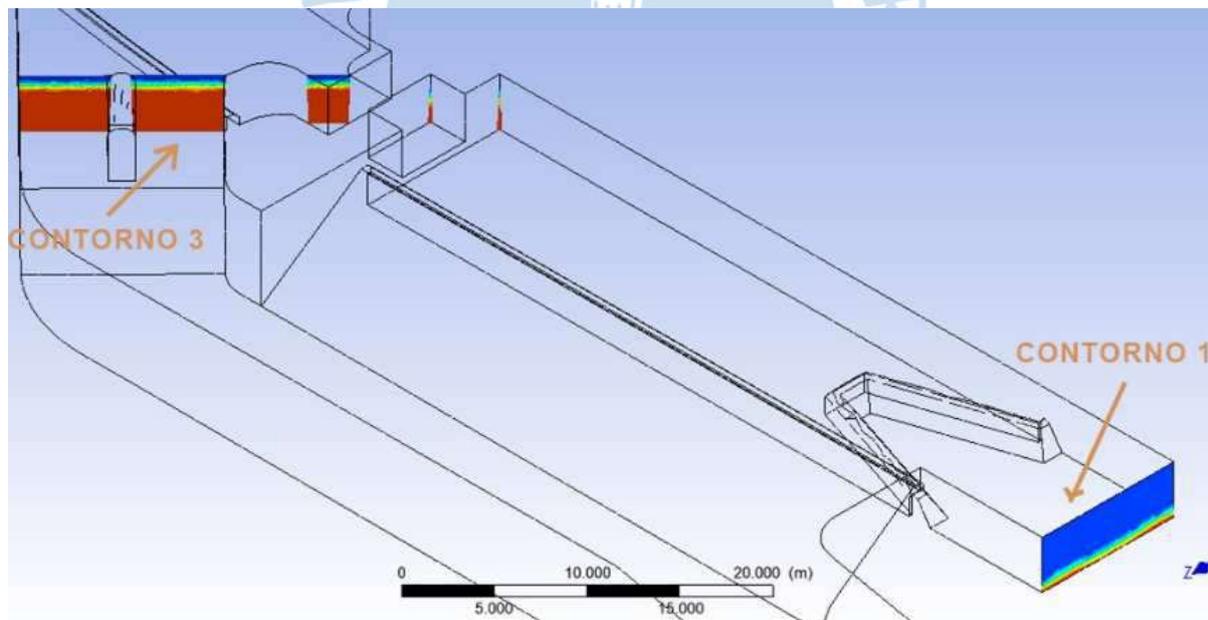


Figura 134. Ubicación de contornos en el dominio.

Fuente: Elaboración propia.

Se extrae los datos correspondientes a tirantes y velocidades utilizando la herramienta *Probe*. El primer paso es ubicar en la pantalla el contorno que utilizaremos, luego asignamos las coordenadas del punto en la parte inferior (Figura 135). Para el contorno 1 iteraremos la coordenada en Y hasta obtener un volumen de fracción de agua cercano a 0.5, correspondiente a la superficie libre, al obtenerlo cambiamos la variable por velocidad del agua.

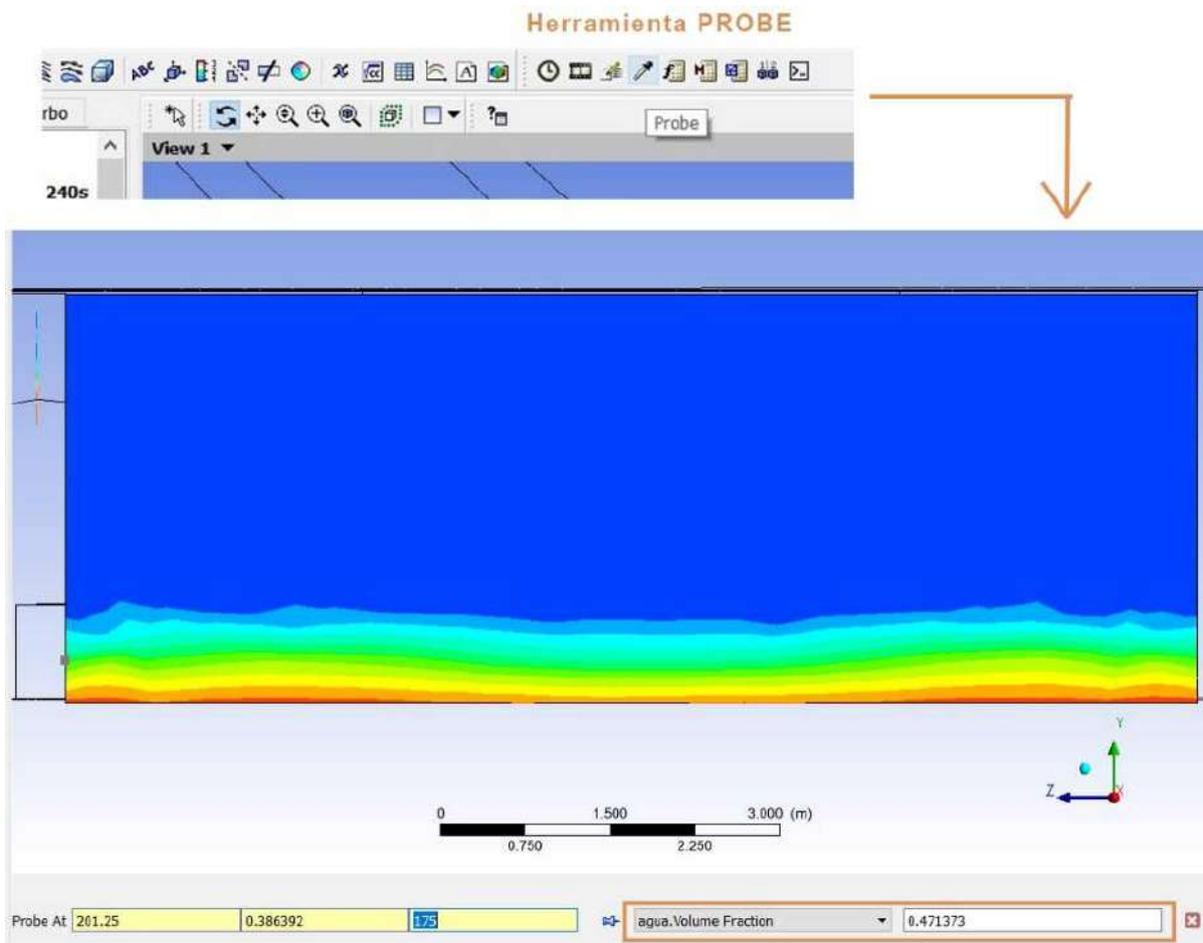


Figura 135. Herramienta *Probe*.

Fuente: Elaboración propia.

Un contorno es la presentación visual del cambio de una variable en una ubicación específica. El color azul representa el valor del volumen de fracción de agua igual a 0: es decir está parte es aire. Su contraparte el color rojo representa el valor de la fase igual 1 o agua. El gradiente de colores representa la transición entre fases, físicamente no existe esta transición, pero debido a la idealización del software se representa por este.

Este procedimiento se aplicó muchas veces para encontrar el tirante y la velocidad del agua superficial en diferentes puntos de los contornos visualizados en la Figura 134. Las mediciones de velocidad de agua se hicieron superficiales y fueron descritos en el capítulo 4. Se detallará a continuación tablas con los resultados obtenidos de tirantes y velocidades.

1. Contorno 1: este se encuentra ubicado en la salida del dominio. En el software se encontró el tirante y la velocidad en los cinco puntos que se muestran la Figura 136, estos datos se promediaron para luego ser comparados con los datos obtenidos del aforo realizado con el método del flotador y descrito en el acápite 4.2.5.

Los datos que se observan en la Tabla 20 corresponden a los tirantes o niveles de agua en el contorno 1. Con respecto a este parámetro hidráulico se obtuvo que el análisis

transitorio presenta una desviación menor respecto a los aforos que el estacionario, teniendo un porcentaje de error del 7.63%, frente al 12.05% del análisis estacionario. Sin embargo, los dos análisis presentan valores bastante cercanos a los medidos en campo.

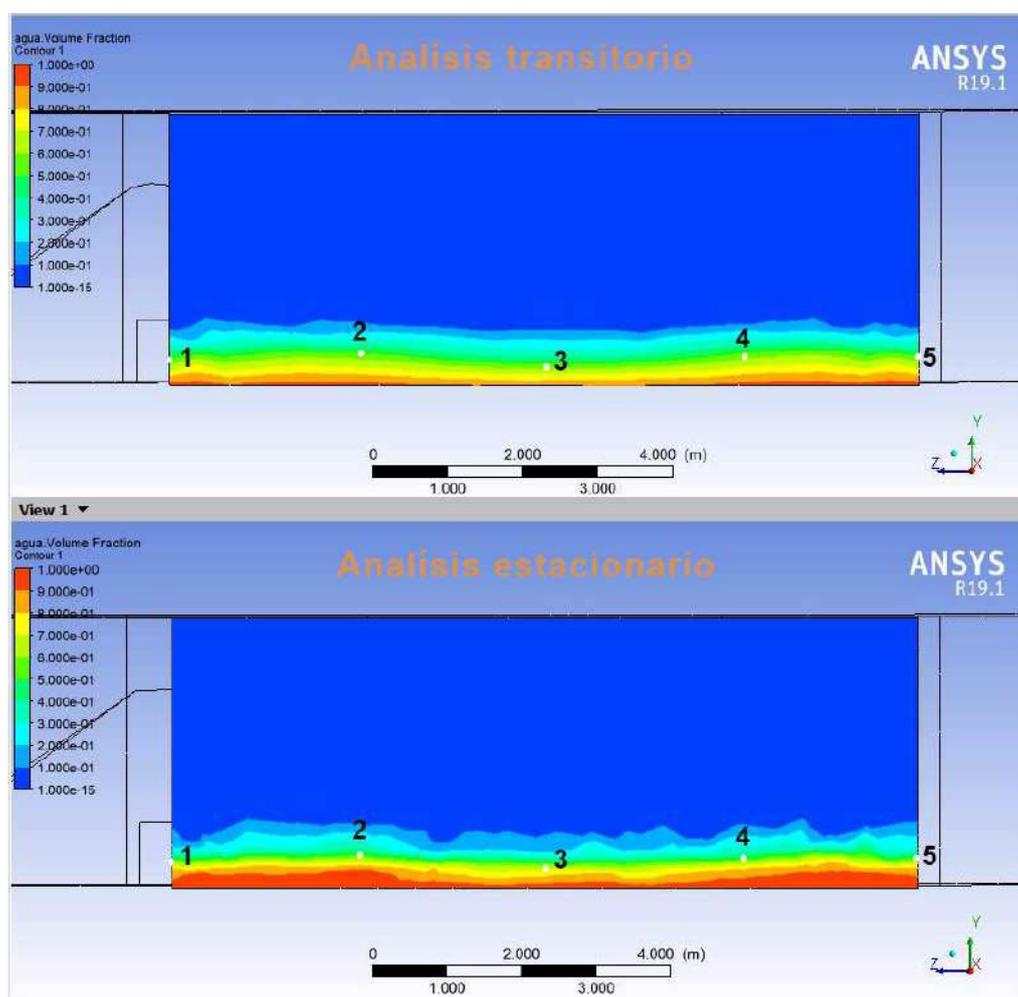


Figura 136. Puntos de medición en contorno 1.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Tirantes en contorno 1.

Pto	Coordenadas absolutas (m)			Agua Volume Fraction	Tirante modelación (m)	Promedio final (m)	Tirante aforo (m)	% Error
	x	y	z					
Análisis transitorio								
1	201.25	0.3624	175.00	0.50000	0.362	0.387	0.360	7.63
2	201.25	0.4443	172.50	0.50003	0.444			
3	201.25	0.2984	170.00	0.50004	0.298			
4	201.25	0.4289	167.50	0.50003	0.429			
5	201.25	0.4035	165.00	0.50001	0.404			
Análisis estacionario								
1	201.25	0.3944	175.00	0.50005	0.394	0.403	0.360	12.05
2	201.25	0.4588	172.50	0.50003	0.459			
3	201.25	0.3417	170.00	0.50008	0.342			
4	201.25	0.3957	167.50	0.50004	0.396			
5	201.25	0.4264	165.00	0.50001	0.426			

Fuente: Elaboración propia.

La modelación presenta velocidades en los cinco puntos estudiados, las mismas se precisan en la Tabla 21. El análisis estacionario presenta una menor desviación respecto a la velocidad encontrada en los aforos a través del método del flotador. Con una velocidad de 3.908 m/s hallada en el aforo frente a 4.186 m/s del análisis transitorio y 4.130 m/s del estacionario.

Tabla 21. Velocidades en contorno 1.

Pto	Coordenadas absolutas (m)			Agua Volume Fraction	Velocidad del agua (m/s)	Promedio final (m/s)	Velocidad aforo (m/s)	% Error
	x	y	z					
Análisis transitorio								
1	201.25	0.3624	175.00	0.50000	2.874	4.186	3.908	7.11
2	201.25	0.4443	172.50	0.50003	4.636			
3	201.25	0.2984	170.00	0.50004	5.032			
4	201.25	0.4289	167.50	0.50003	5.044			
5	201.25	0.4035	165.00	0.50001	3.342			
Análisis estacionario								
1	201.25	0.3944	175.00	0.50005	2.541	4.130	3.908	5.68
2	201.25	0.4588	172.50	0.50003	4.696			
3	201.25	0.3417	170.00	0.50008	5.214			
4	201.25	0.3957	167.50	0.50004	5.210			
5	201.25	0.4264	165.00	0.50001	2.991			

Fuente: Elaboración propia.

- Contorno 3:** este contorno se extrajo en un plano ubicado en la bocatoma y creado a partir de 3 coordenadas absolutas en el dominio (Figura 131). Por las limitaciones descritas en el acápite 4.2.2, la comparación se realizará con respecto a los valores de velocidades y tirante obtenidos en puntos específicos en el espacio. Al realizar el aforo en esta ubicación se identificó una zona de recirculación de agua tal y como presentan la Figura 64 y la Figura 137, por esta razón se consideró cuatro puntos de medición. Los datos obtenidos de la modelación y el aforo se presentan en la Tabla 22 y Tabla 23.

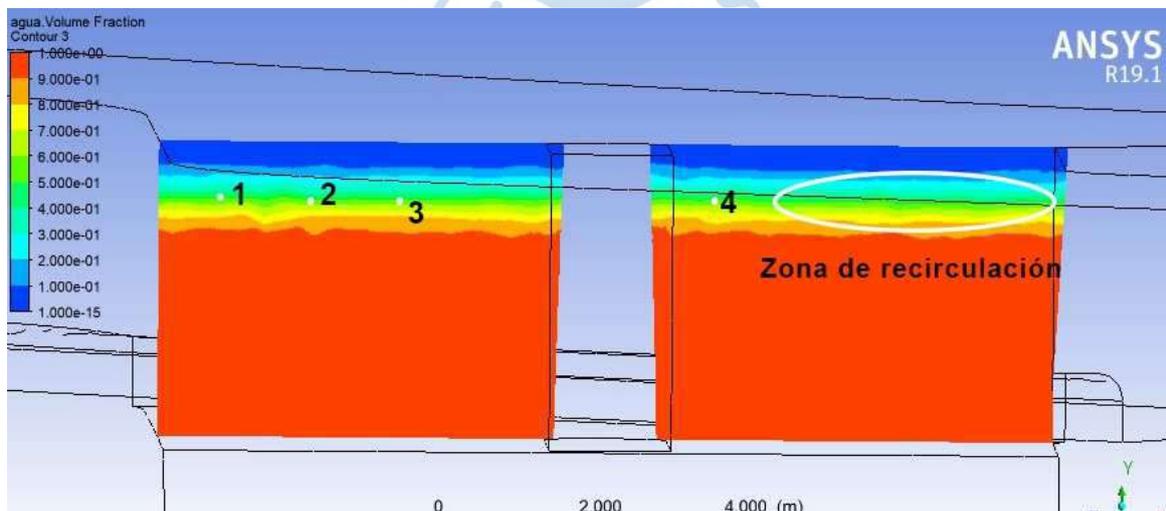


Figura 137. Puntos de medición en contorno 3.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Parámetros hidráulicos para contorno 3 en análisis transitorio.

Análisis transitorio								
Pto	Coordenadas absolutas (m)			Agua Volume Fraction	Tirante (m)	Velocidad del agua (m/s)	Velocidad de aforo (m/s)	% Error
	x	y	z					
1	132.537	2.992	182.844	0.50001	2.992	0.840	1.097	23.4
2	133.241	2.975	182.133	0.50001	2.975	0.878	1.138	22.8
3	133.944	2.989	181.422	0.50007	2.989	0.921	1.071	14.0
4	136.94	3.021	178.389	0.50008	3.021	0.770	0.803	4.1
Prom T final					2.993			
Tirante aforo					2.750			
% Error					8.84			

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis transitorio se obtuvo un error del 8.84 % respecto al tirante medido durante el aforo y las velocidades en estas coordenadas absolutas presentan una mayor desviación con desviación desde el 4.1 % al 23.4 %.

Tabla 23. Parámetros hidráulicos para contorno 3 en análisis estacionario.

Análisis estacionario								
Pto	Coordenadas absolutas (m)			Agua Volume Fraction	Tirante (m)	Velocidad del agua (m/s)	Velocidad de aforo (m/s)	% Error
	x	y	z					
1	132.537	3.015	182.844	0.50003	3.015	1.026	1.097	6.4
2	133.241	3.024	182.133	0.50004	3.024	1.103	1.138	3.1
3	133.944	3.025	181.422	0.50001	3.025	1.099	1.071	2.6
4	136.943	3.012	178.389	0.50003	3.012	0.954	0.803	18.8
Prom T final					3.017			
Tirante aforo					2.750			
% Error					9.70			

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis estacionario se obtuvo un error de 9.70 % respecto al tirante medido, cuyo valor es mayor al que presenta el análisis transitorio. Sin embargo, cuando evaluamos la velocidad, sus resultados presentan en su mayoría una cercanía a los obtenidos durante el aforo; teniendo valores de hasta 2.6 %.

En el complemento *Results* también podemos obtener la *Isosurface* de alguna variable importante para el análisis, y así poder identificar visualmente los campos de flujo. Esta herramienta crea una superficie en 3D en la ubicación donde una variable tiene cierto valor; se puede asignar otra variable para que se visualice como la velocidad del agua.

El primer paso para crear una *Isosurface* es desplegar las opciones de *Location*, luego clic en *Isosurface* como lo indica la Figura 138. Después se le asigna un nombre y clic en Ok. Se abrirá una ventana para ingresar los detalles de la iso superficie, en la pestaña *Geometry* se selecciona el criterio con el cual se creará la superficie; para esta modelación usaremos el volumen de fracción de agua con un valor de 0.5 para que se visualice la superficie libre del dominio. Luego en la pestaña *Color* seleccionamos la variable que se visualizará, configuraremos *agua.velocity* (Figura 138) y finalmente clic en aplicar.

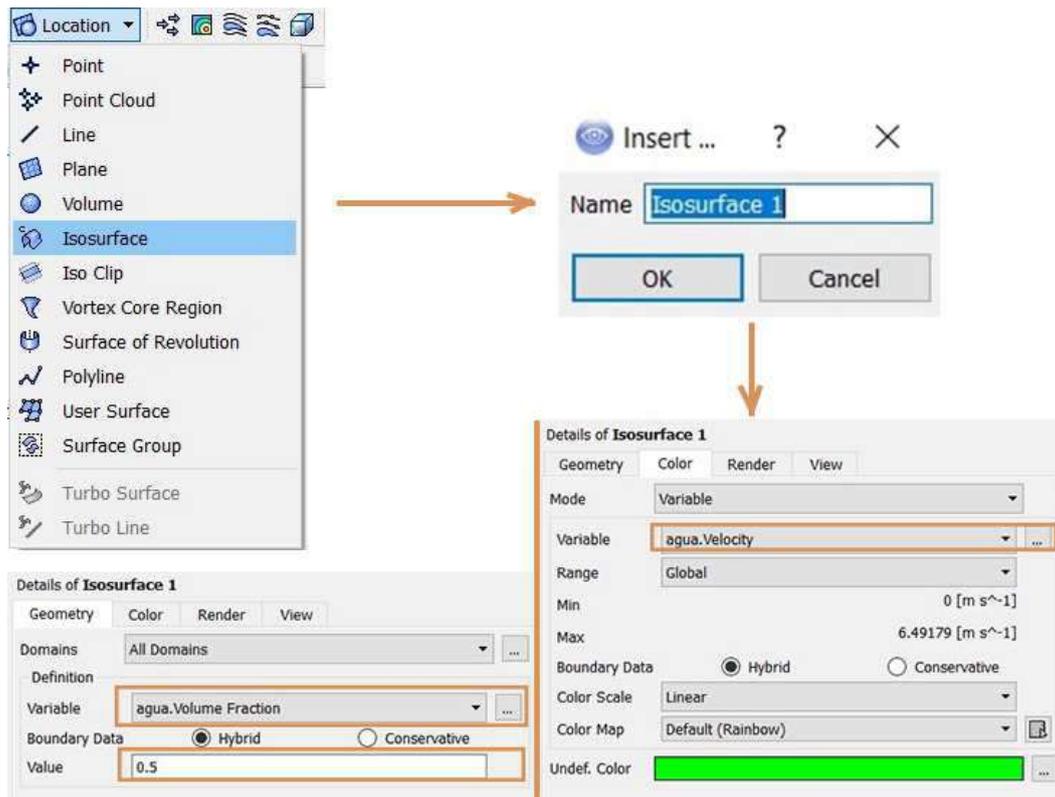


Figura 138. Creación de *Isosurface*.

Fuente: Elaboración propia.

Creamos una iso superficie para cada análisis como se muestra en la Figura 139, al realizar un análisis visual vemos que la caída del agua desde el vertedero lateral a la rápida hidráulica difiera un poco entre el análisis estacionario y transitorio. Se muestra con mayor detalle la caída de agua en el vertedero en la Figura 140. En el análisis estacionario se muestra un gradiente de velocidad en una mayor distancia, es decir presenta una onda en el agua de una mayor longitud. El análisis transitorio nos arroja una caída con una menor onda, pero con velocidades más altas. Además, el análisis estacionario nos muestra una mayor turbulencia en esta zona como lo muestra la Figura 140.

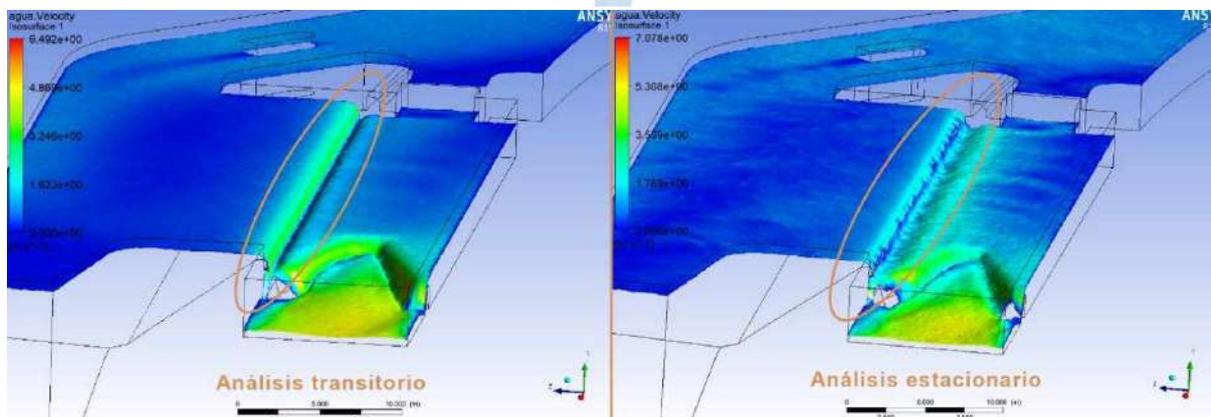


Figura 139. Flujo de agua en vertedero lateral.

Fuente: Elaboración propia.

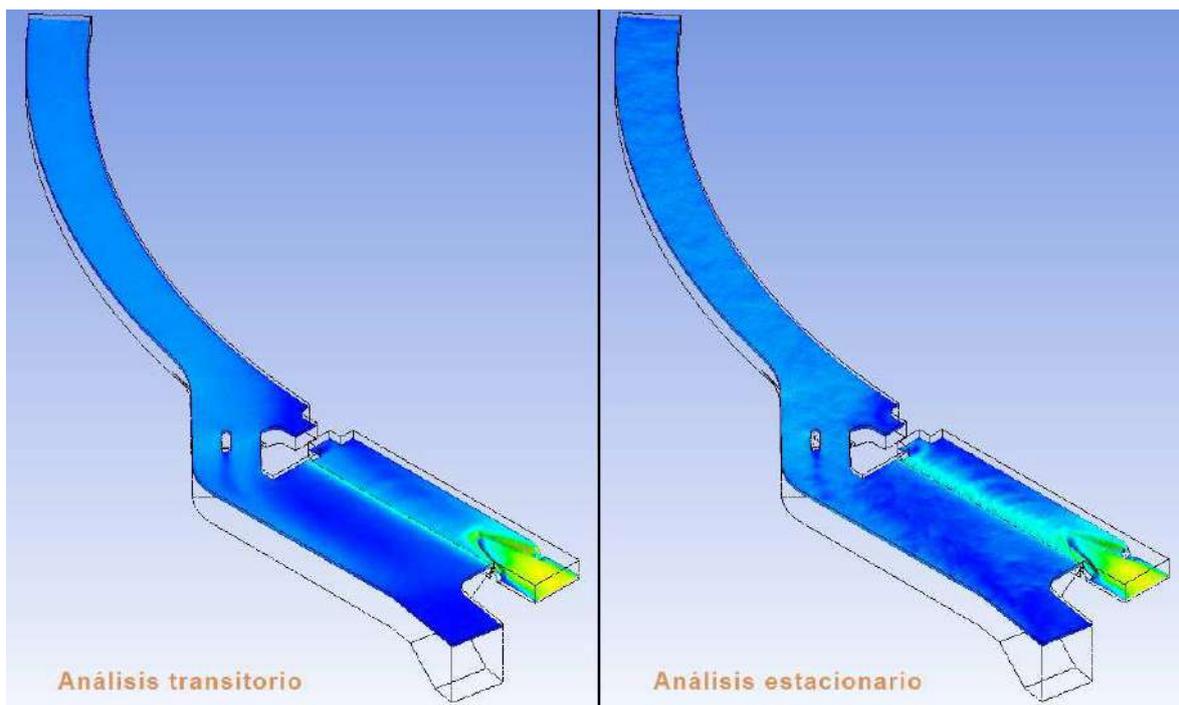


Figura 140. *Isosurfaces* de los análisis transitorio y estacionario.

Fuente: Elaboración propia.

Realizando una comparación visual de los resultados obtenidos en las modelaciones (Figura 140) y las fotografías tomadas durante la realización de las visitas de campo a la estructura hidráulica que se muestran en la Figura 141, podemos concluir que el análisis estacionario con refinamiento en la superficie libre describe de mejor manera el comportamiento real del flujo para la estructura que estamos modelando. Además, este tipo de análisis con refinamiento en la superficie libre obtuvo buenos resultados respecto a lo obtenidos en los aforos como se mostró anteriormente. Cabe destacar que la compleja geometría de la estructura no permitió realizar un mallado refinado en la superficie libre para el análisis transitorio debido a que este tipo de análisis no permite mallado adaptativo.



Figura 141. Fotografías de la caída de agua desde el vertedero lateral.

Fuente: Elaboración propia.

Después de presentar la comparación de tirantes y velocidades obtenidas de los contornos y aforo realizado y hacer una comparación visual del flujo, se concluye que para este tipo de estructuras se describe mejor el flujo utilizando la configuración propuesta para el análisis estacionario. El refinamiento de mallado aplicado en el análisis estacionario puede visualizarse en el complemento *Results* como se muestra en la Figura 142.

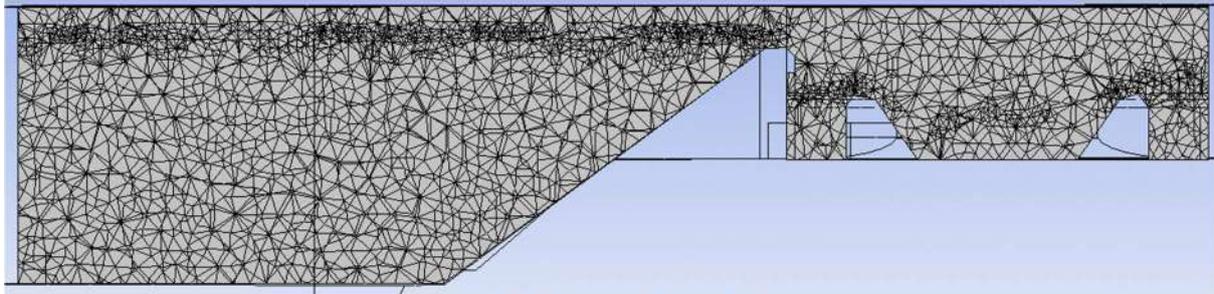


Figura 142. Refinamiento de mallado en el dominio con *Mesh Adaption*.

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Rápida hidráulica

La modelación anterior se realizó para encontrar el caudal de entrada a la rápida hidráulica como ya se ha explicado. La extracción del caudal de salida y el ingreso del mismo en la modelación se explicará en la sección de definición de la física del modelo.

En primer lugar, se simuló un dominio con mallado adaptativo y análisis estacionario, pero no se cumplieron los parámetros numéricos para aceptar la modelación detallada en el acápite 2.2.9; por esta razón se optó por un análisis transitorio con refinamiento en la superficie libre.

Cabe resaltar que en análisis transitorios no puede utilizarse la herramienta de mallado adaptativo o *mesh adaption* por esta razón se realizó el refinamiento de forma manual. Previamente se dividió el dominio en el software SolidWorks en 14 sólidos diferentes con el fin de poder aplicar algún refinamiento o método de mallado diferente a los mismos. La división se muestra en la Figura 143.

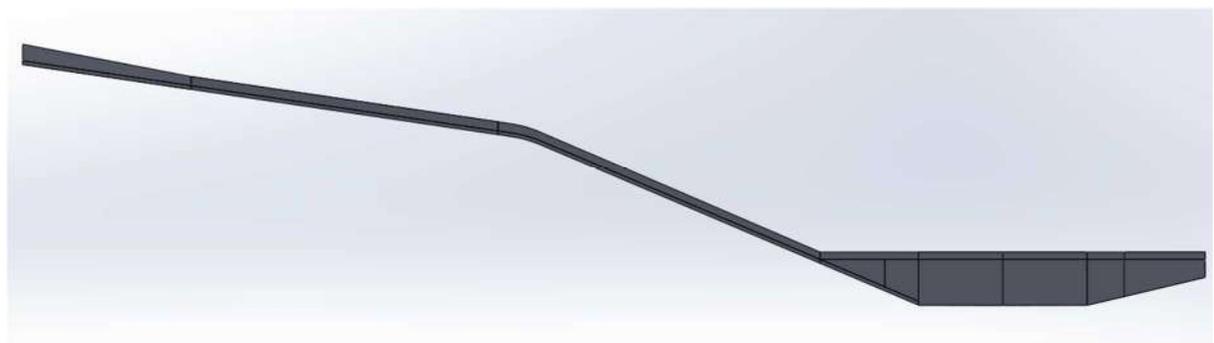


Figura 143. Dominio dividido en el software SolidWorks.

Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a importar la geometría desde SolidWorks al módulo *Design Modeler* de Ansys con el formato de archivo de Parasolid .x_t; se ingresó al complemento *Geometry* del paquete computacional ANSYS CFX como lo muestra la Figura 144.

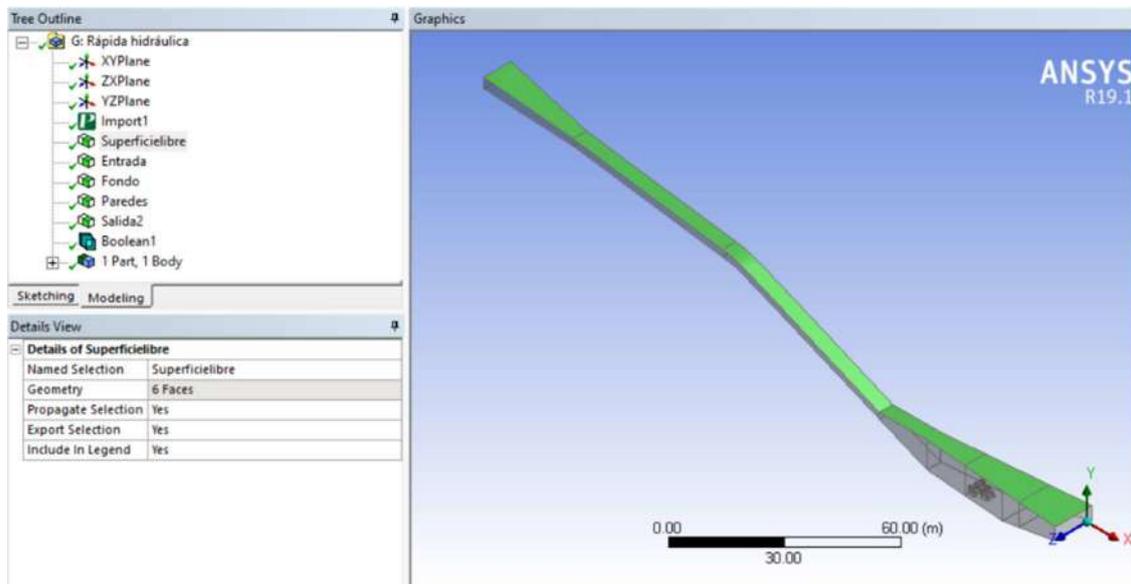


Figura 144. Geometría de rápida hidráulica importada a *DESIGN MODELER*.

Fuente: Elaboración propia.

Después de realizada la importación se asignó las condiciones de frontera que se detallan en la Figura 145 con la ayuda de la herramienta “*Named Selection*”.

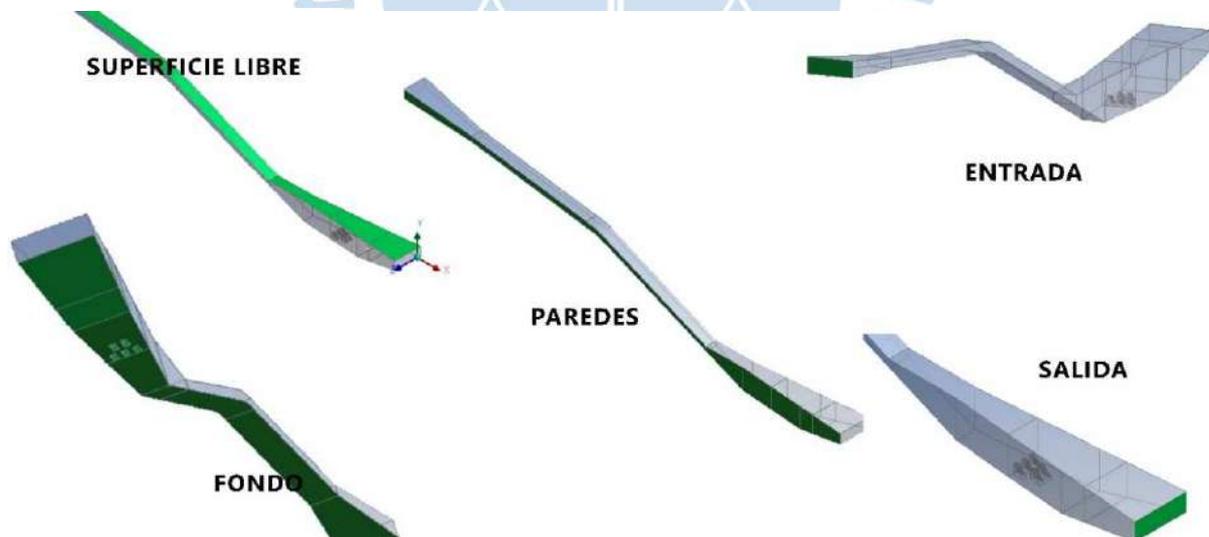


Figura 145. Condiciones de frontera definidas en la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1. Diseñar y crear la malla

Para iniciar el proceso de mallado, se ejecuta el complemento *Meshing* desde el Workbench. Al importar la geometría en el complemento *Geometry*, el software identifica con distintos colores los sólidos del dominio como lo muestra la Figura 146.

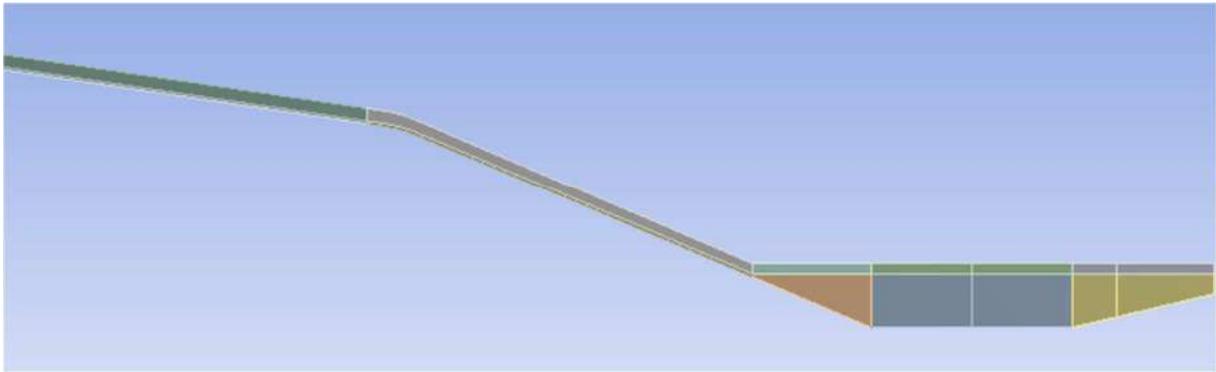


Figura 146. Sólidos en complemento *Meshing*.

Fuente: Elaboración propia.

La geometría de la rápida hidráulica no es compleja ni presenta curvas pronunciadas, lo que facilitó la división de la misma. Además, su geometría lineal permitió el uso de elementos hexaédricos en el mallado; lo que conlleva el uso de menos recursos computacionales para hallar una solución a la modelación.

En este mallado se utilizó diferentes tipos de elementos, a diferencia del mallado de la cámara de carga en el que se usó solo elementos tetraédricos. Para insertar un método de mallado hacemos clic derecho en *Mesh* y luego en *Method* (Figura 147). Luego seleccionamos los sólidos como lo detalla la Figura 148, para finalmente configurar el método entre los que se encuentran *hex dominant* o elementos hexaédricos, *tetrahedrons* o tetraédricos y *sweep*. Este último constituye una combinación entre los tipos de elementos de mallado.

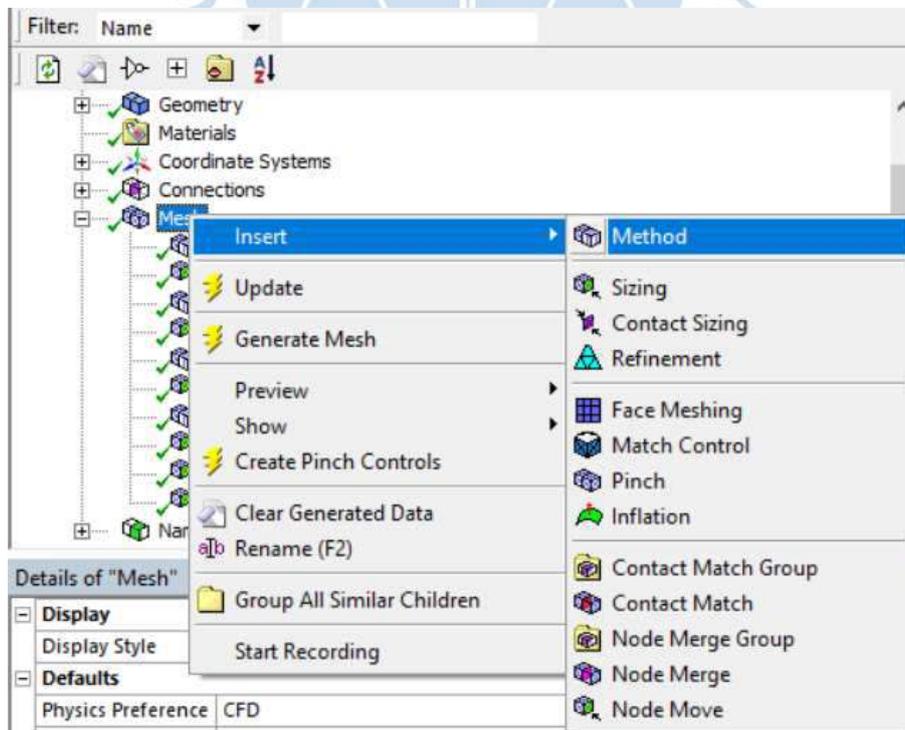


Figura 147. Métodos de mallado.

Fuente: Elaboración propia.

Details of "Hex Dominant Method 2" - Method	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Method	Hex Dominant

Figura 148. Detalles de métodos de mallado.

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron cuatro diferentes métodos de mallado en distintos sólidos (Figura 149), destacando mallado hexaédrico en el tramo lineal de rápida y tetraédrico en la zona donde se produce el resalto hidráulico. Se limitó el tamaño de los elementos de la malla utilizando la herramienta *body sizing*; debajo de la superficie libre con elementos de 7 cm y de 30 cm encima de la misma. Además, con la herramienta *face sizing* se refinó los dados disipadores de la poza.

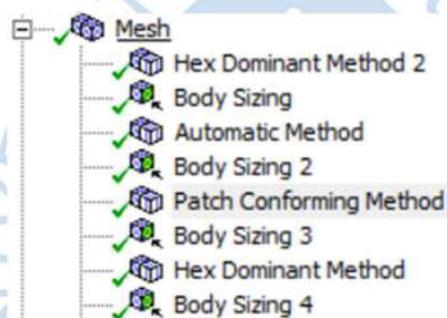


Figura 149. Configuración de mallado para rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

No se profundizará en el procedimiento para configurar el mallado dado que se ha explicado anteriormente, sin embargo, presentaremos los parámetros de calidad de malla obtenidos para esta modelación en la Tabla 24. Se observa que todos los parámetros cumplen con las condiciones presentadas anteriormente; por lo que se deduce que el mallado propuesto es el correcto y tenemos una buena calidad de malla (Figura 150).

Tabla 24. Resumen datos de mallado 3.

Indicador	Cantidad		
Nodos	2 206 781		
Elementos	3 243 960		
Métodos de mallado			
Método	Tamaño		Cantidad
<i>Body sizing</i>	0.075 - 0.3	m	5
<i>Face sizing</i>	0.075	m	1
Parámetros de calidad de malla			
Parámetro	Min	Prom	Max
Calidad del elemento	0.0047	0.8161	1.0000
Aspecto del elemento	1.0000	2.3015	3320.3000
Oblicuidad	0.0000	0.2644	1.0000
Ortogonalidad	0.0000	0.7980	1.0000

Fuente: Elaboración propia.

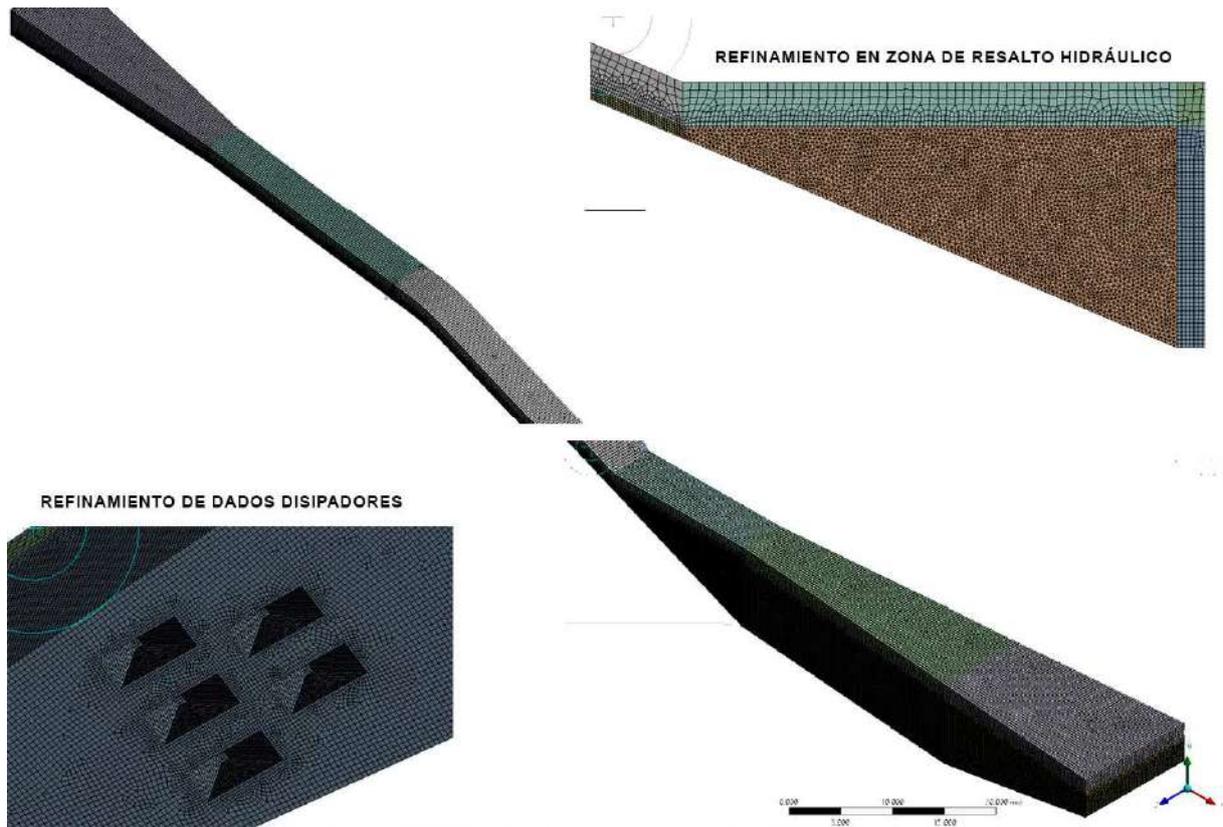


Figura 150. Mallado de la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. Definición de la física del modelo

Para definir esta parte no se explicará el procedimiento detallado, ya que la modelación es muy parecida a la expuesta en el acápite 5.2.2.2. La única diferencia entre ambas es que se utilizó el perfil de velocidad de salida de la modelación anterior para ingresarla en la rápida hidráulica en la condición de frontera de entrada. Para extraer este perfil de la modelación de la cámara de carga, en primer lugar, vamos al complemento *CFX Post* desde el *Workbench* en la modelación de la cámara de carga. Luego seleccionamos el contorno creado en la salida del dominio, desplegamos el menú *file* y clic en *export* (Figura 151).

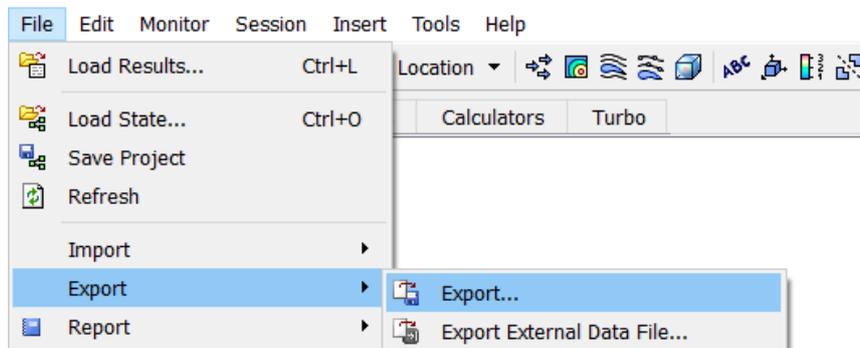


Figura 151. Exportar perfil de velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

Al ingresar a la ventana de exportación seleccionamos el formato de perfil *Generic*, ubicación de Salida y las variables físicas que deseamos exportar; para esta modelación exportamos las velocidades superficiales en los tres ejes (Figura 152). Además, en esta ventana se coloca el nombre del perfil extraído que se le asignara al documento exportado en formato .csv compatible con Microsoft Excel.

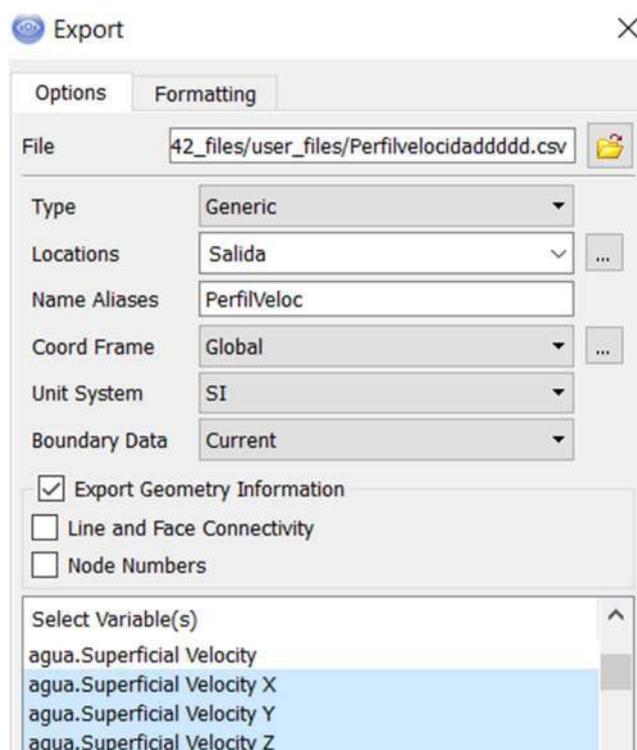


Figura 152. Exportación de variables físicas de salida.

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso es adaptar el formato del perfil *Generic* al perfil BC. Agregamos los campos espaciales X, Y e Z y los ejes deben estar en minúsculas en el área de data (Figura 153).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	[Name]							PERFIL GENÉRICO
3	PerfilVeloc							
4								
5	[Data]							
6	X [m], Y [m], Z [m],	agua.Superficial Velocity X [m s ⁻¹],	agua.Superficial Velocity Y [m s ⁻¹],	agua.Superficial Velocity Z [m s ⁻¹],				
7	2.01250000e+02,	3.25700283e+00,	1.73844742e+02,	3.09100879e-12,	-1.04569221e-10,	-2.66851038e-12		

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	[Name]							
2	PerfilVeloc							
3								
4	[Spatial Fields]							BC PERFIL
5	x, y, z							
6								
7	[Data]							
8	x [m], y [m], z [m],	agua.Superficial Velocity X [m s ⁻¹],	agua.Superficial Velocity Y [m s ⁻¹],	agua.Superficial Velocity Z [m s ⁻¹],				
9	2.01250000e+02,	3.25700283e+00,	1.73844742e+02,	3.09100879e-12,	-1.04569221e-10,	-2.66851038e-12		

Figura 153. Perfil de velocidad en formato .csv.

Fuente: Elaboración propia.

Luego ingresamos a la modelación de la rápida hidráulica en el CFX Pre. Vamos al menú *Tools* y clic en *Initialize Profile Data* para ingresar el perfil de velocidad en formato .csv (Figura 154). Siguiendo con el procedimiento se abrirá una ventana como la que se muestra en la parte izquierda de la Figura 155; aquí ingresaremos el perfil trabajado anteriormente y finalmente hacemos clic en aplicar. Al ingresar el perfil se mostrará en el CFX Pre (Figura 155) debajo de las expresiones en la sección de funciones de usuario o *user functions*.

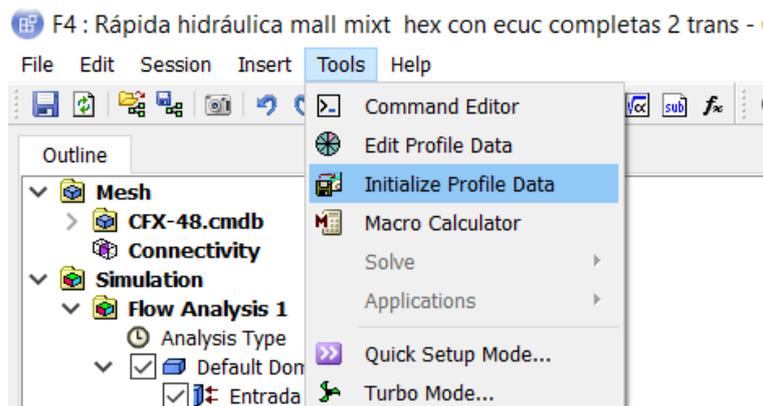


Figura 154. Inicializar perfil de data.

Fuente: Elaboración propia.

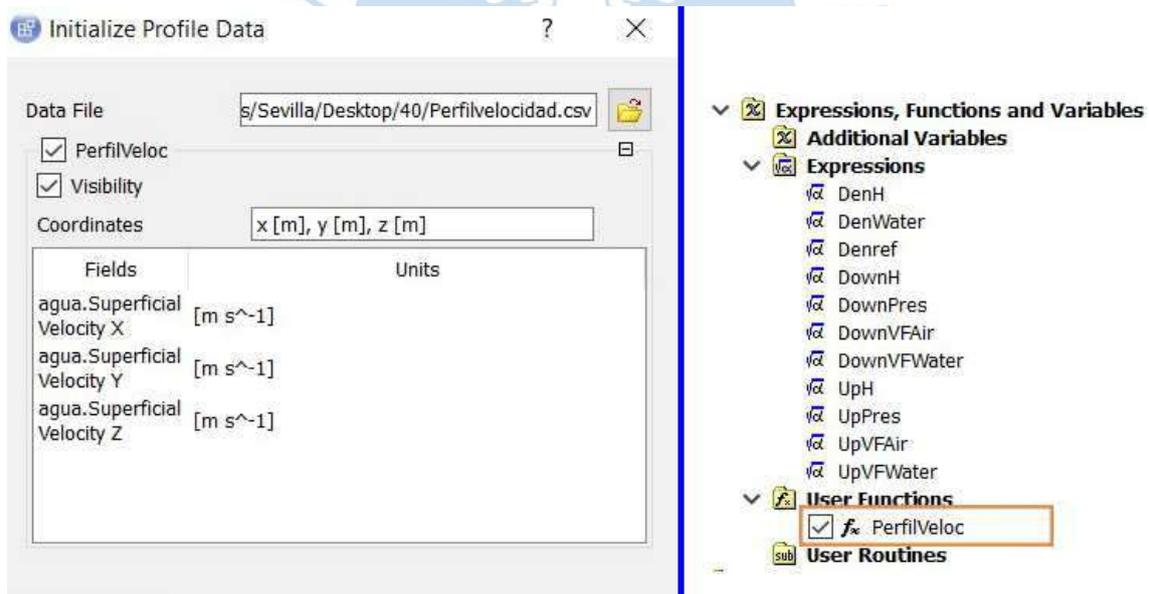


Figura 155. Ingresando perfil de velocidad al CFX Pre.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, con el perfil dentro de la modelación se debe proceder a ingresarlo en la condición de frontera de entrada. En primer lugar, creamos la condición de frontera; luego activamos la opción *Use profile data* en las configuraciones básicas y finalmente hacemos clic en *Generate values* (Figura 156). Al generar los valores se ingresará las expresiones correspondientes en la pestaña de detalles de límite en cada uno de los ejes. Dentro de la condición de frontera las demás configuraciones son las mismas que en el acápite 5.2.2.2.

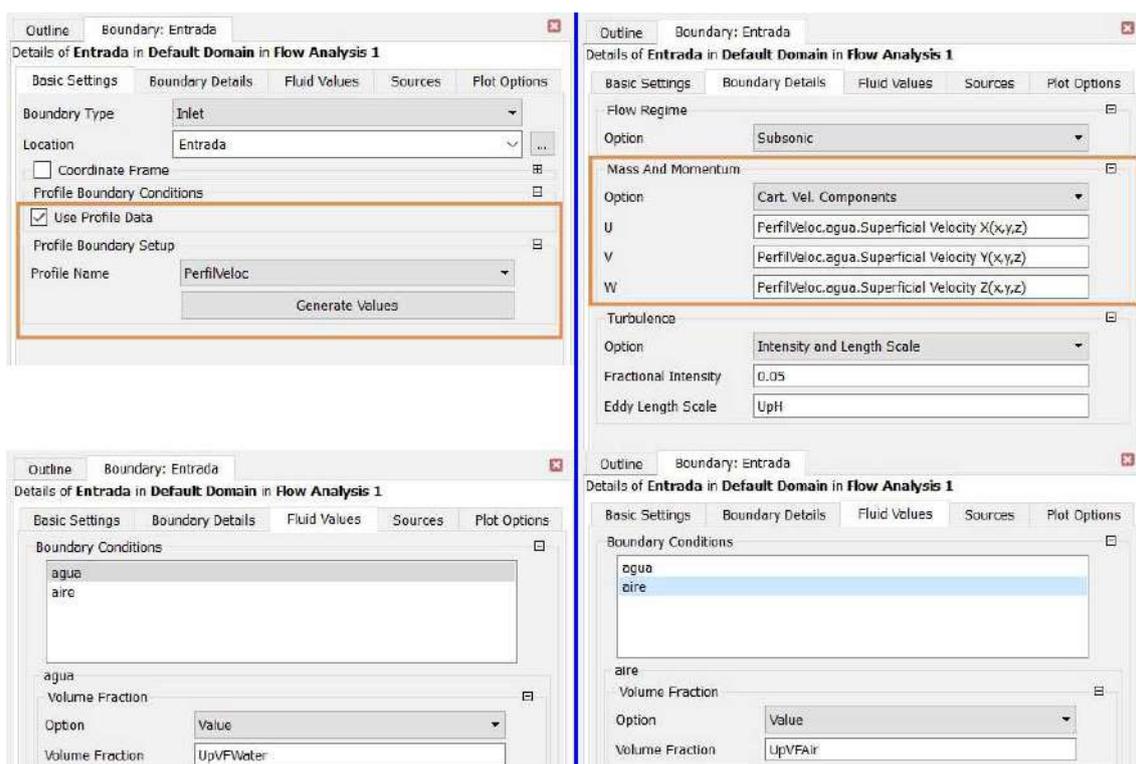


Figura 156. Configuración de la condición de frontera de entrada en la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Como sabemos CFX *Post* nos muestra automáticamente la configuración colocada al modelo en reportes. La configuración precisada para este modelo se detalla en las Tabla 25 y Tabla 26.

Tabla 25. Resumen de parámetros físicos del dominio en la rápida hidráulica.

Domain - Default Domain	
Type	Fluid
Location	B1030, B1031, B1032, B1033, B1034, B1035, B1310, B317, B318, B319, B320, B321
Materials	
Water	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
Air at 25 C	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
Settings	
Buoyancy Model	Buoyant
Buoyancy Reference Density	Denref
Gravity X Component	0.0000e+00 [m s ⁻²]
Gravity Y Component	-9.8100e+00 [m s ⁻²]
Gravity Z Component	0.0000e+00 [m s ⁻²]
Buoyancy Reference Location	Automatic
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Homogeneous Model	Off
Turbulence Model	SST
Turbulent Wall Functions	Automatic

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Resumen de parámetros físicos de condiciones de frontera en la rápida hidráulica.

Boundary - Entrada	
Type	INLET
Location	Entrada
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Cartesian Velocity Components
U	PerfilVeloc.agua.Superficial Velocity X(x,y,z)
V	PerfilVeloc.agua.Superficial Velocity Y(x,y,z)
W	PerfilVeloc.agua.Superficial Velocity Z(x,y,z)
Turbulence	Intensity and Length Scale
Eddy Length Scale	UpH
Fractional Intensity	5.00E-02
Fluid	agua
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	UpVFWater
Fluid	aire
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	UpVFAir
Boundary - Superficie libre	
Type	OPENING
Location	Superficialibre
Settings	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Entrainment
Relative Pressure	0.0000e+00 [Pa]
Turbulence	Zero Gradient
Fluid	agua
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	0.00E+00
Fluid	aire
Volume Fraction	Value
Volume Fraction	1.00E+00
Boundary - Salida	
Type	OUTLET
Location	Salida2
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Static Pressure
Relative Pressure	DownPres
Boundary - Fondo	
Type	WALL
Location	Fondo
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Rough Wall
Sand Grain Roughness Height	3.6000e-01 [mm]
Boundary - Paredes	
Type	WALL
Location	Paredes
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Rough Wall
Sand Grain Roughness Height	3.6000e-01 [mm]

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas anteriores se detalló las configuraciones ingresadas en el dominio y condiciones de frontera; en las mismas se utilizó las expresiones definidas en el acápite 5.2.2.1 con la única diferencia que los niveles de agua en puntos aguas arriba y abajo son diferentes.

La expresión UpH correspondiente al tirante aguas arriba se definió como el tirante de salida de la cámara de carga, pasando a tomar un valor de 0.36 m. Por otro lado, la expresión $DownH$ o tirantes aguas abajo paso a ser el tirante de salida de la poza disipadora; definido con sus coordenadas absolutas en el modelo de -37.83 m que corresponde a 0.30 m de tirante en salida.

El tipo de análisis se definió como transitorio con un tiempo total de 240 s y un paso de tiempo de 0.5 s. Además, para la configuración del *Solver control* se consideró un valor residual promedio o RMS de 1×10^{-4} y imbalances de 1%.

En el menú de control de salida configuramos puntos de monitoreo a lo largo del dominio para evaluar la solución encontrada por el software, se colocaron algunos puntos en la zona del resalto hidráulico como se muestra en la Figura 157. Además se monitoreo la velocidad promedio en la cara de entrada y salida de la rápida hidráulica utilizando la expresión: $agua.massFlowAve(Velocity)@Entrada$. Para evaluar la velocidad en una ubicación específica se utilizó la expresión $agua.velocity$ como lo muestra la Figura 158 para el punto 1.

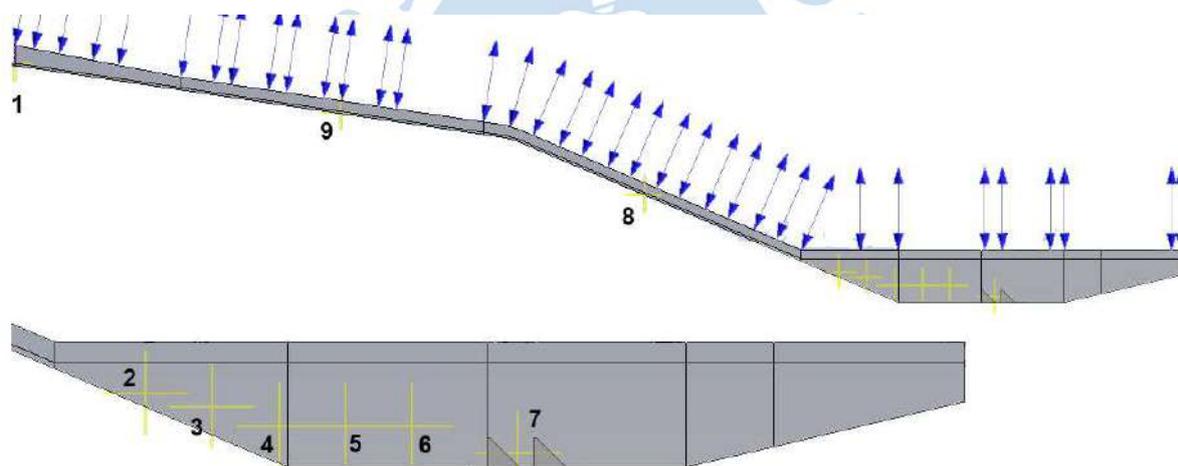


Figura 157. Puntos de monitoreo en la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

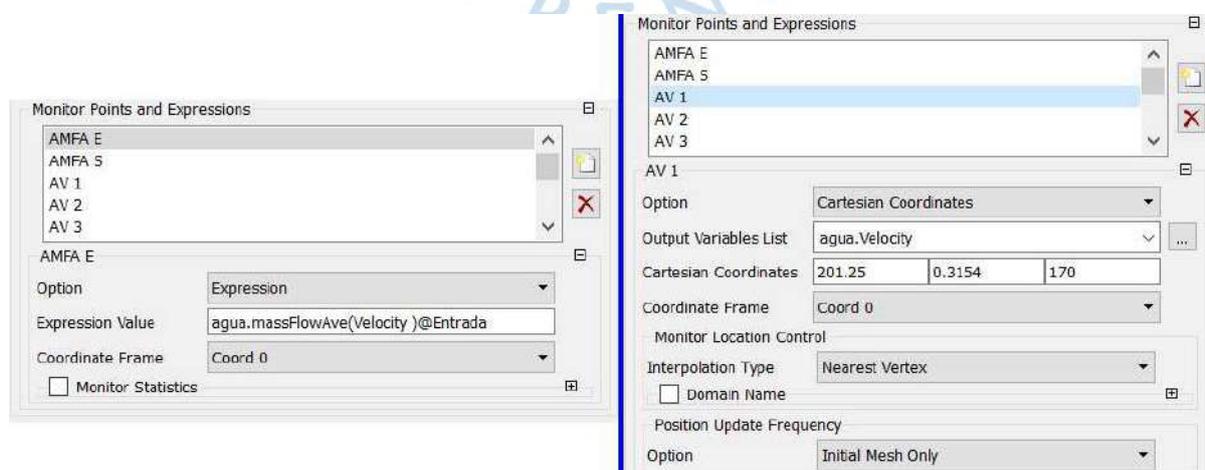


Figura 158. Puntos de monitoreo en la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en las condiciones de inicialización se ingresó la velocidad de salida de la modelación correspondiente a la cámara de carga, con un valor de 4.60 m/s y una presión relación asignada con la expresión *UpPres*.

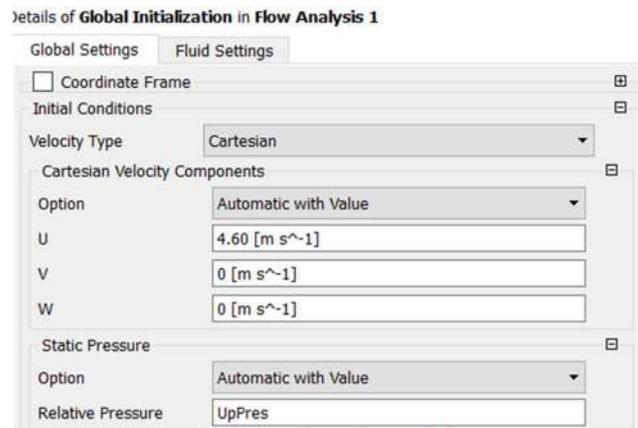


Figura 159. Condiciones de inicialización en la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. Calcular la solución

Como sabemos el complemento *Solution* resuelve los sistemas de ecuaciones correspondiente para encontrar una solución a la modelación. Ingresaremos al complemento desde el *Workbench* luego configuramos la solución, para esta modelación se ejecutó la simulación con 4 núcleos en paralelo del computador. Los RMS promedio o residuales promedio alcanzaron un valor de 10^{-4} , considerando que se obtuvo un buen comportamiento en los mismos. Además, no presentan mucha oscilación en sus valores (Figura 160).

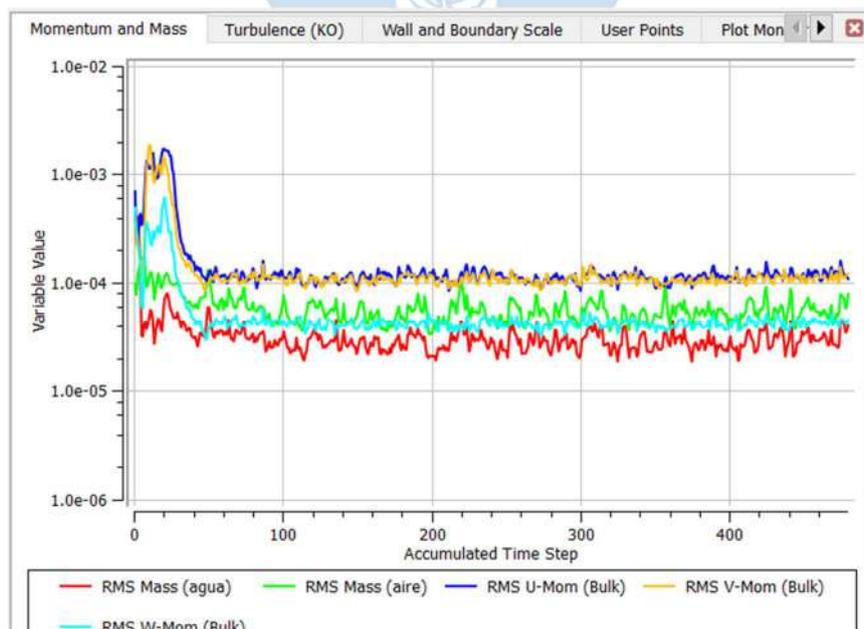


Figura 160. Residuales promedios de la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Los imbalances obtenidos en la modelación presentan un comportamiento oscilatorio, en un rango muy pequeño entre -1 y 1 %, por esta razón se consideran aceptables dado que es permisible una variación de 1% (Figura 161).

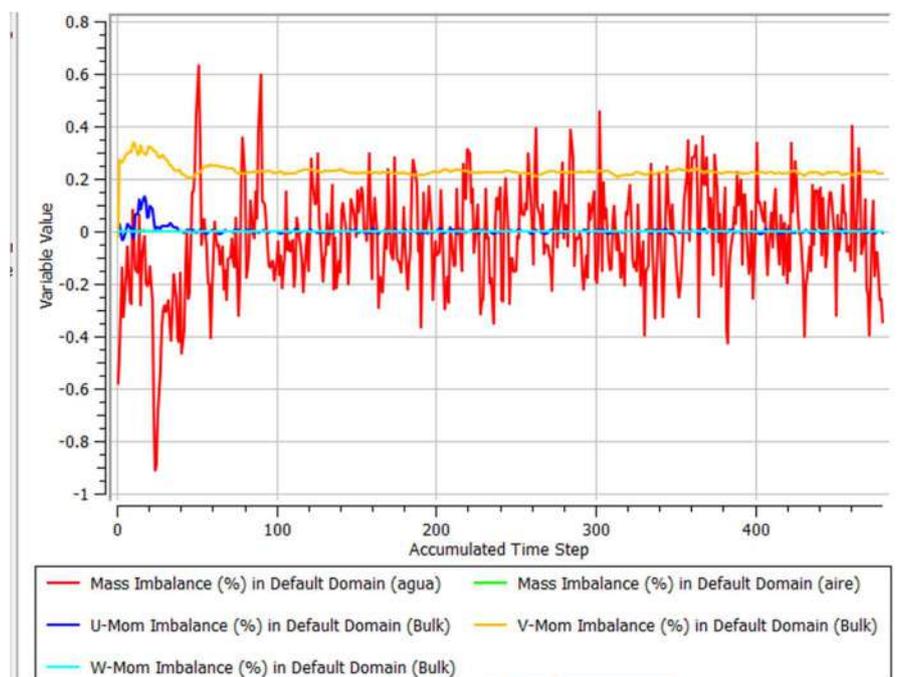


Figura 161. Imbalances de la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Los puntos de monitoreo presentaron un comportamiento dividido es decir algunos tendieron a un valor estable de la variable física y otros presentaron un comportamiento oscilatorio como se observa en la Figura 162.

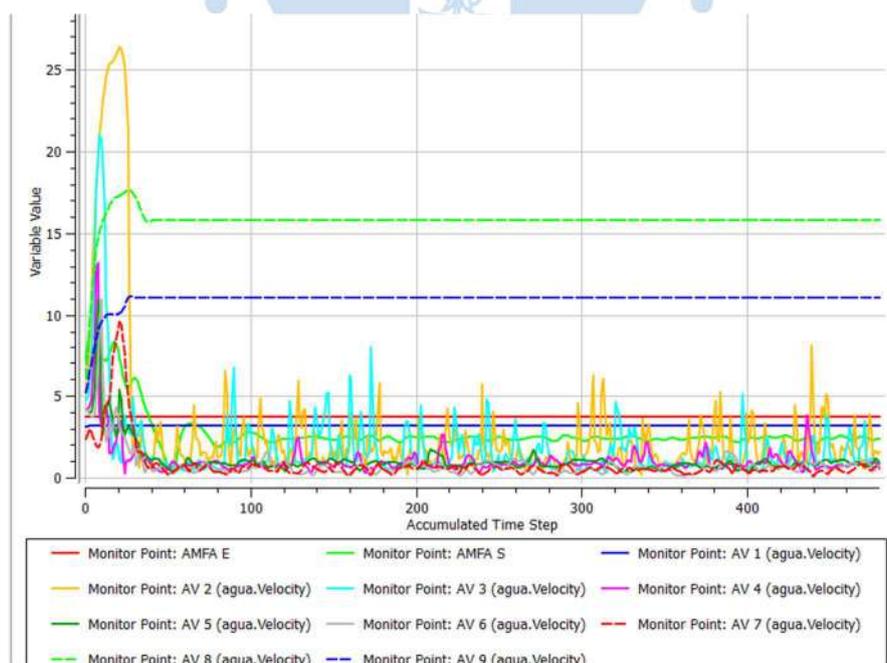


Figura 162. Puntos de monitoreo en la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la gráfica observamos que los puntos 1, 8, 9 presentaron un comportamiento estable; recordemos que estos se encuentran ubicados en la transición y el canal de la rápida (Figura 157). Sin embargo, los puntos 2, 3, 4, 5, 6 y 7 presentan un comportamiento oscilatorio, esto es razonable debido a que se encuentran en el resalto hidráulico o cerca de este; donde se produce una gran turbulencia por lo que el flujo no es estable. Además, los puntos 2, 3 y 4 presentan un mayor rango de oscilación, esto puede deberse a que se encuentran en el centro del resalto hidráulico donde la turbulencia es mayor.

Finalmente se deduce que la modelación cumple con todos los criterios numéricos para ser aceptada. Si bien algunos puntos de monitoreo no alcanzaron un estado estable, esto se debe a la naturaleza física del fenómeno y no a un error numérico. Además, el *Solver* nos muestra algunas variables físicas con su rango de valores, estadísticas de la malla, etc. (Figura 163).

Mesh Statistics		
Domain Name : Default Domain		
Total Number of Nodes	=	2206781
Total Number of Elements	=	3243960
Total Number of Tetrahedrons	=	1126437
Total Number of Prisms	=	35259
Total Number of Hexahedrons	=	1789633
Total Number of Pyramids	=	292631
Total Number of Faces	=	496004

Variable Range Information		
Domain Name : Default Domain		
Variable Name	min	max
aire.Density	1.18E+00	1.18E+00
aire.Dynamic Viscosity	1.93E-05	1.93E-05
agua.Density	9.97E+02	9.97E+02
agua.Dynamic Viscosity	8.90E-04	8.90E-04
agua.Velocity u	-4.17E+00	1.69E+01
agua.Velocity v	-7.25E+00	1.21E+01
agua.Velocity w	-4.67E+00	4.27E+00
Pressure	-1.93E+03	7.78E+04
aire.Conservative Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
agua.Conservative Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
aire.Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
agua.Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
agua.Turbulence Kinetic Energy	6.07E-05	1.66E+01
agua.Turbulence Eddy Frequency	5.40E-02	4.80E+02
aire.Eddy Viscosity	8.57E-06	3.22E-01
agua.Eddy Viscosity	7.21E-03	2.71E+02
Eddy Viscosity	8.57E-06	2.35E+02
aire.Wall Distance	0.00E+00	4.55E+00
agua.Wall Scale	-6.30E-02	1.09E+01
agua.Wall Distance	0.00E+00	4.55E+00

Average Scale Information	
Domain Name : Default Domain	
Global Length	= 1.8401E+01
Minimum Extent	= 1.3460E+01
Maximum Extent	= 2.1042E+02
aire.Density	= 1.1850E+00
aire.Dynamic Viscosity	= 1.8310E-05
aire.Velocity	= 7.9851E+00
aire.Advection Time	= 2.3045E+00
aire.RMS Courant Number	= 5.2935E+01
aire.Maximum Courant Number	= 3.7857E+04
aire.Reynolds Number	= 5.5055E+06
aire.Mass (Conservative)	= 4.7300E+03
aire.Mass (Normalised)	= 4.7301E+03
aire.Volume	= 3.9915E+03
aire.Volume Fraction	= 6.4061E-01
agua.Density	= 9.9700E+02
agua.Dynamic Viscosity	= 8.8950E-04
agua.Velocity	= 7.9851E+00
agua.Advection Time	= 2.3045E+00
agua.RMS Courant Number	= 1.2516E+03
agua.Maximum Courant Number	= 1.7334E+06
agua.Reynolds Number	= 1.6462E+05
agua.Mass (Conservative)	= 2.2325E+06
agua.Mass (Normalised)	= 2.2325E+06
agua.Volume	= 2.2393E+03
agua.Volume Fraction	= 3.5939E-01
Wave Speed	= 1.3436E+01
Froude Number	= 5.9432E-01

Figura 163. Parámetros mostrados en el *Solver* en la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6

Resultados

En este capítulo se presentarán y analizarán los resultados obtenidos de la modelación de la rápida hidráulica estudiada. El CFX Post es el complemento utilizado para analizar, visualizar y presentar los resultados de forma interactiva.

El análisis se realizará mediante:

- **Streamline:** gráficos que las líneas de corriente del flujo del flujo.
- **Isosurface:** visualización de la superficie libre.
- **Contour:** visualización de la variación de variables físicas en el dominio. Solo se observará la velocidad y el volumen de fracción de agua.

6.1. Tirantes y velocidades analíticos

Los datos obtenidos de la modelación se compararán con los resultados de los cálculos realizados de acuerdo a la geometría y a los conceptos hidráulicos descritos en el acápite 1.1. Se efectuará el cálculo del tirante y velocidad a lo largo de la rápida hidráulica en los puntos que muestra la Figura 164, utilizando la Ecuación 1 – 8 de conservación de energía. Los datos iniciales en el punto 1 fueron extraídos del modelo de la cámara de carga y los datos geométricos de los puntos de cálculo detallados en la Tabla 27 se encontraron en los planos del proyectos descritos en el Anexo A.

Tabla 27. Datos iniciales y en los puntos de cálculo.

DATOS INICIALES	Caudal	Q (m ³ /s)	18.641	
	Ancho de solera	b (m)	10.000	
	Tirante de agua	y (m)	0.403	
	Velocidad	v (m/s)	4.626	
Datos geométricos en puntos de cálculo				
Zona	Pto	b (m)	Z (m s.n.m)	Pendiente
Transición	1	10.00	61.34	0.1473
	2	5.00	56.89	
Canal de rápida hidráulica	3	5.00	48.00	0.4311
	4	5.00	20.50	
Poza disipadora	5	7.48	18.02	-
	6	13.46	23.02	

Fuente: Elaboración propia.

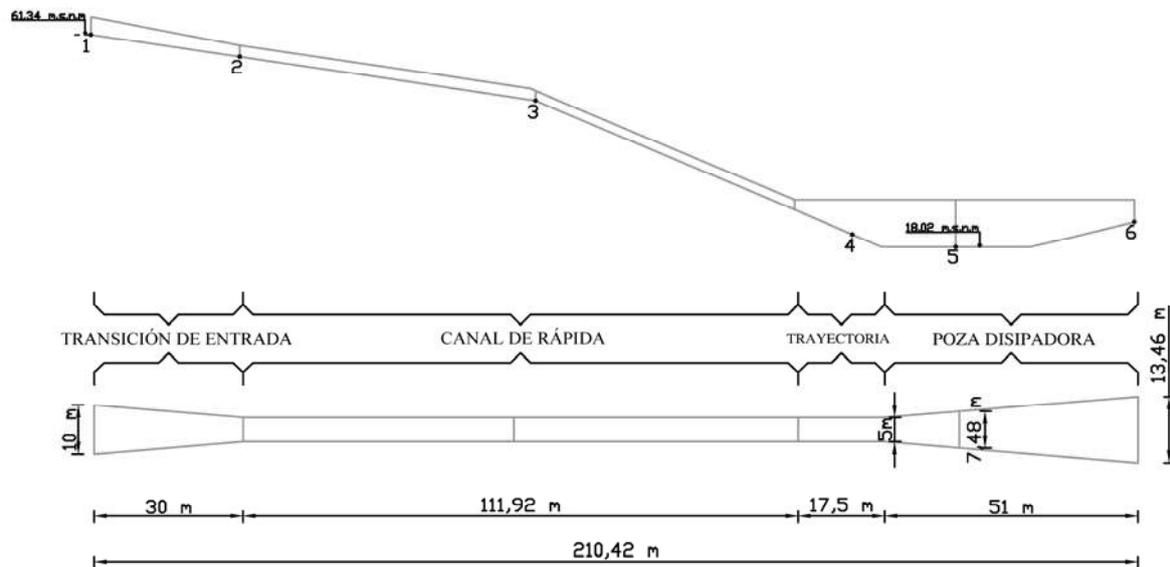


Figura 164. Geometría de la rápida hidráulica y puntos de cálculo.

Fuente: Elaboración propia.

Partiendo de la Ecuación 1 – 8 aplicamos la conservación de energías entre el punto 1 y 2 considerando el valor de α como 1 y las pérdidas con la ecuación de pérdidas en una transición como la encontrada.

$$\text{Energía}_1 = \text{Energía}_2 + h_{1-2}$$

$$Z_1 + y_1 + \alpha * \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \alpha * \frac{v_2^2}{2g} + 0.145 * \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g}$$

$$61.34 + 0.403 + \frac{4.626^2}{2 * 9.81} = 56.89 + y_2 + \frac{\left(\frac{18.6414}{y_2 * 5}\right)^2}{2 * 9.81} + 0.145 * \frac{\left(\left(\frac{18.6414}{y_2 * 5}\right)^2 - 4.626^2\right)}{2 * 9.81}$$

$$y_2 = 0.3764 \text{ m}$$

Por la Ecuación 1 – 6 de continuidad:

$$V_2 = 9.9051 \text{ m/s}$$

Siguiendo este procedimiento se encontró los tirantes y velocidades correspondientes a los puntos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 que se detallan en la Tabla 28. Posteriormente se realizará una comparación de estos valores con los resultados obtenidos de la modelación.

Tabla 28. Resultados de tirantes y velocidades de agua en la rápida hidráulica.

Resultados de tirantes y velocidades					
Zona	Pto	b (m)	Z (m s.n.m)	y (m)	v (m/s)
Transición	1	10.00	61.34	0.3600	4.6000
	2	5.00	56.89	0.3764	9.9051
Canal de la rápida hidráulica	3	5.00	48.00	0.2528	14.7468
	Inicio resalto (4)	5.00	20.50	0.1600	23.7970
Poza disipadora	Fin del resalto	6.24	18.02	4.2235	0.9024
	5	7.48	18.02	5.2823	0.7058
	6	13.46	23.02	0.2823	4.9059

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 165 nos muestra el nivel de agua correspondiente a toda la estructura. Vemos que el resalto hidráulico encargado de disipar la energía del flujo comienza en el punto 4 luego tiene un tirante conjugado de 4.224 m y finalmente se produce una curva hasta alcanzar el tirante normal de 5.282 m. El resalto producido es un resalto ahogado. Por otra parte, el tirante de salida de la poza disipadora es de 0.28 m y la línea punteada representa el tirante crítico. De este podemos deducir que en los puntos 1, 2, 3 y 4 se da un flujo supercrítico y en los puntos 5 y 6 pasa a ser subcrítico.

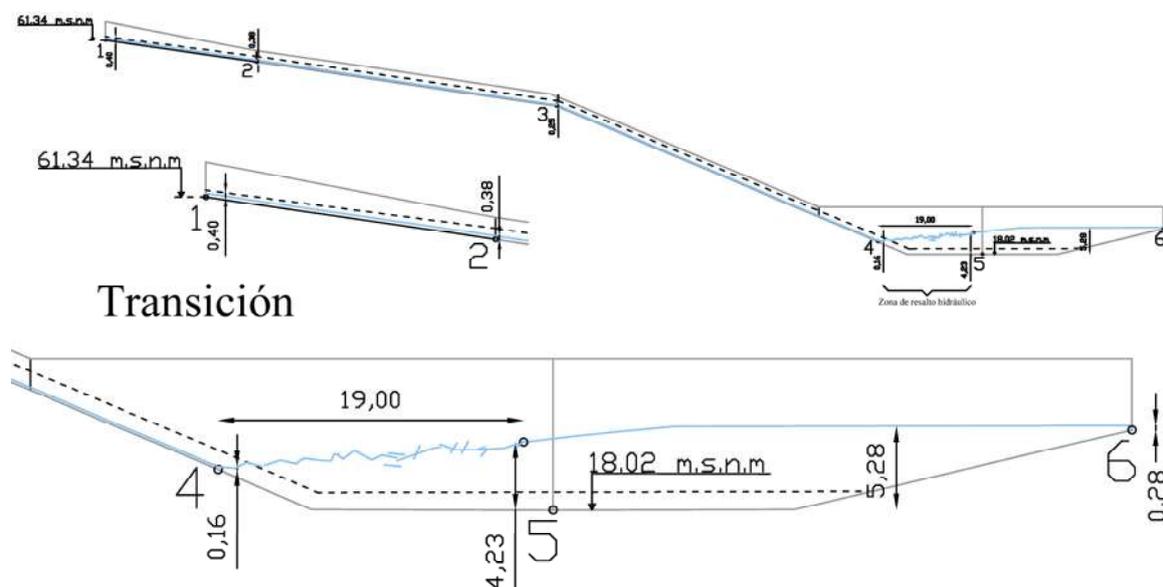


Figura 165. Tirantes de agua a lo largo de la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Líneas de corriente

El complemento *Results* nos permite visualizar las líneas de corriente. Para esto, desplegamos el menú insertar luego hacemos clic en *streamline*. Finalmente, en los detalles de configuración de línea de corriente (Figura 166) se precisa el comienzo de las líneas en la ubicación de entrada, el número de puntos y la variable física como velocidad del agua.

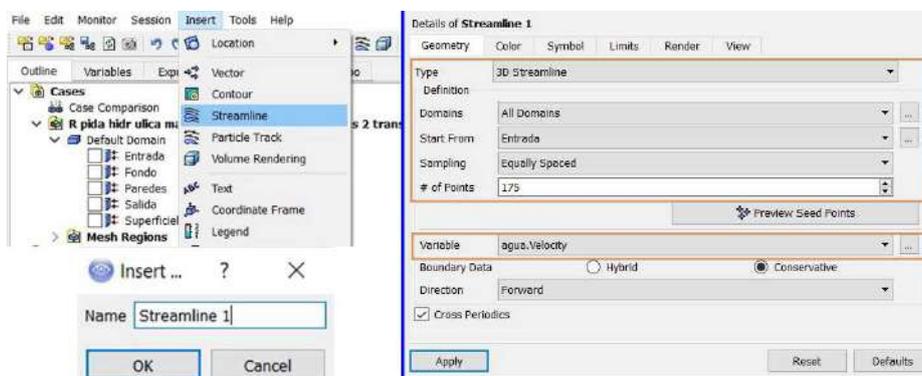


Figura 166. Líneas de corriente en complemento *Results*.

Fuente: Elaboración propia.

Finalizada la configuración de la línea de corriente hacemos clic en aplicar. Después se mostrará en la ventana de trabajo el gráfico obtenido y aparece su ícono correspondiente en la ventana *Outline* como se muestra en la Figura 167. De las líneas de corriente en la Figura 168 podemos observar la trayectoria del flujo, además la turbulencia en el resalto, el choque de las líneas de corriente en los dados disipadores y el gradiente de velocidad en la estructura.

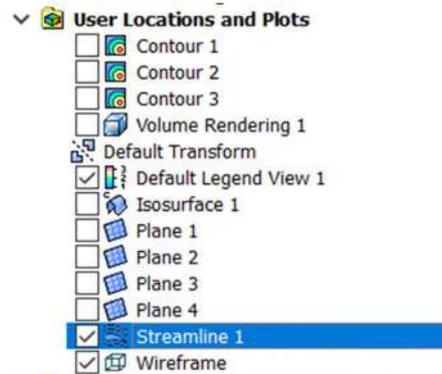


Figura 167. Líneas de corriente en *outline* del CFX Post.

Fuente: Elaboración propia.

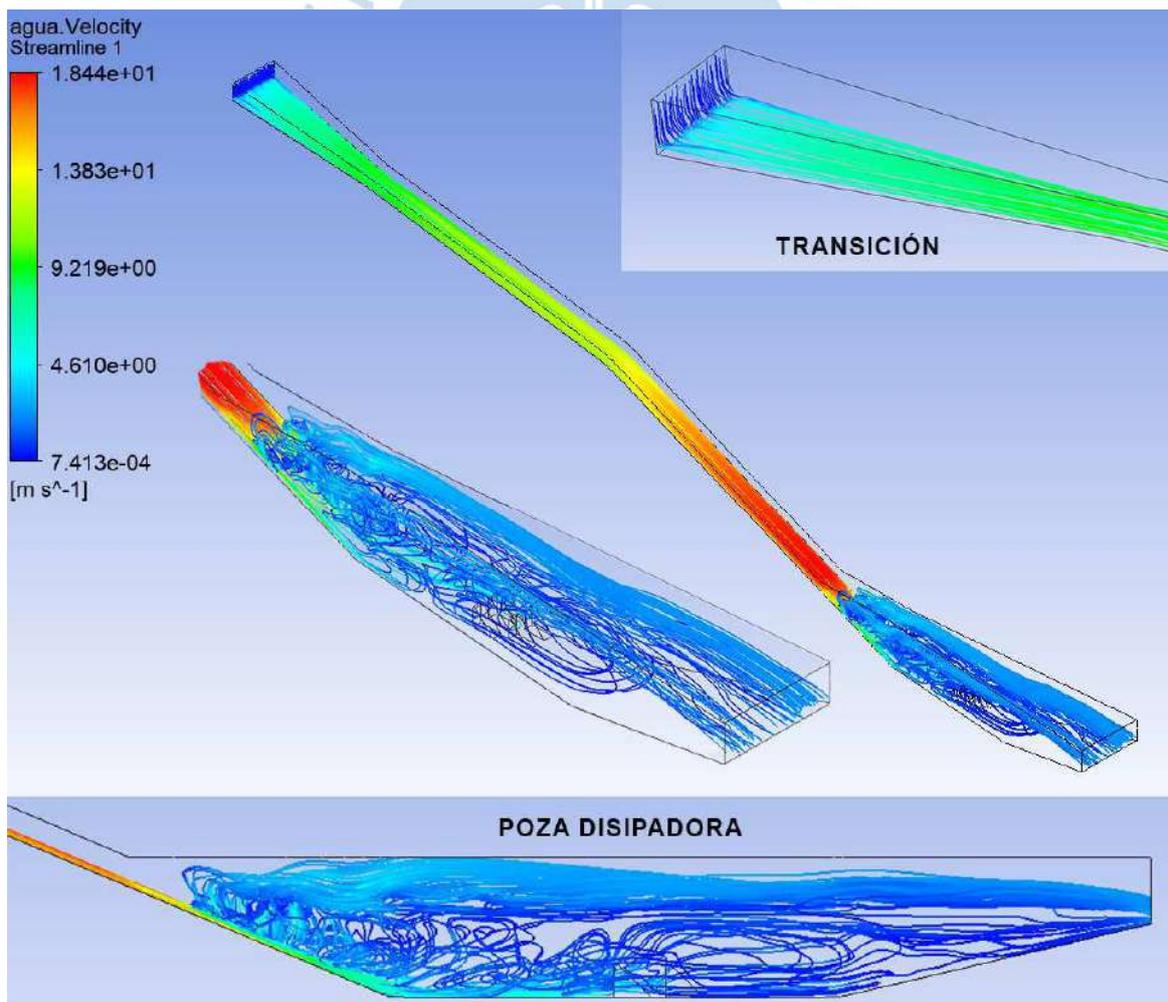


Figura 168. Líneas de corriente en la rápida hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Podemos deducir además que existe una gran turbulencia en el resalto hidráulico por el desorden que muestran las líneas de corriente en este. También se observa que a partir de la mitad de la poza disipadora las líneas de corriente disminuyen su oscilación tendiendo a ser un flujo laminar a partir de la salida de la poza, lo que indica que si se produce una buena disipación de energía.

6.3. Resalto hidráulico

Sabemos que el resalto hidráulico es un medio que se utiliza para disipar la energía del flujo. En esta rápida hidráulica se calculó el tirante de entrada al resalto, el tirante conjugado de salida y la longitud del mismo. Estos parámetros se compararán con los obtenidos en el CFX Post con la ayuda de la herramienta contorno que se ha explicado anteriormente.

Para efectuar este análisis se obtendrán cuatro contornos repartidos equitativamente en el ancho de la rápida hidráulica separados un metro entre ellos como se muestra en la Figura 169. En cada uno de estos contornos se comparará la medida de los tirantes conjugados del resalto hidráulico, la ubicación de los mismos y la longitud del resalto. Estos contornos han sido creados usando la variable de volumen de fracción de agua lo que quiere decir que nos dicen donde se encuentra el agua y el aire en el dominio. La superficie libre es representada por el color verde.

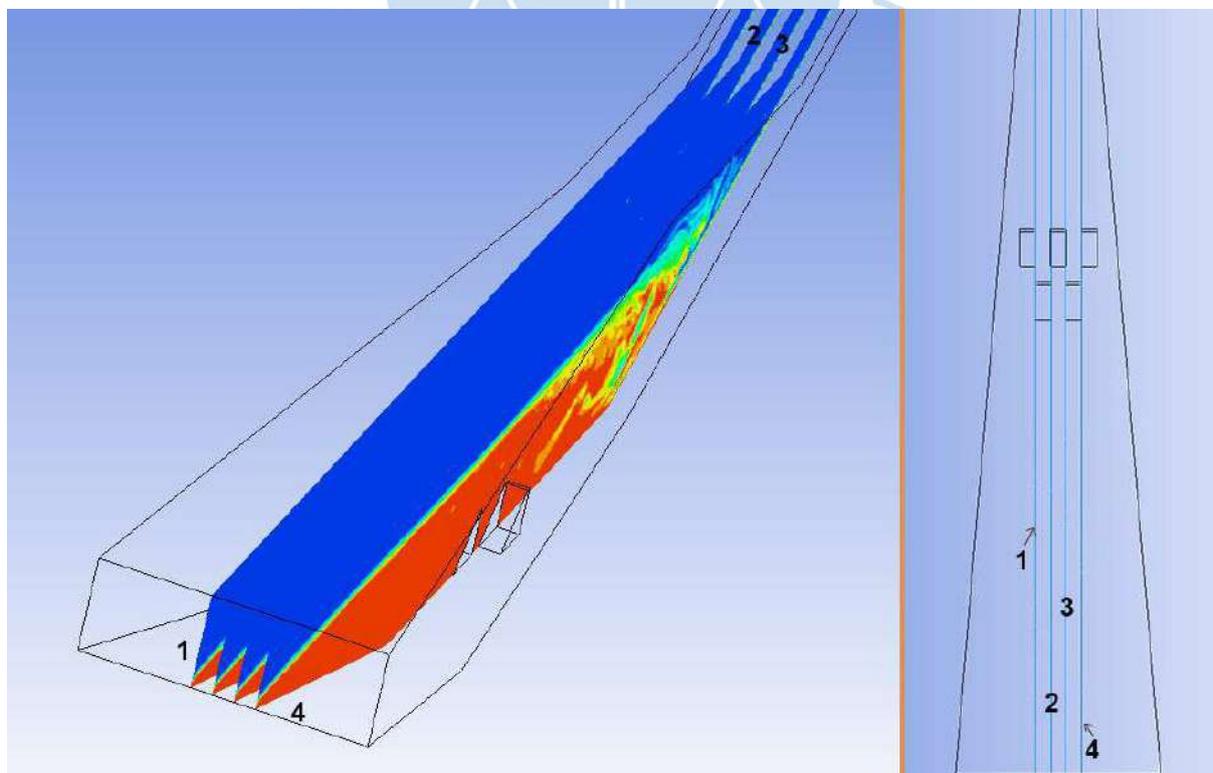


Figura 169. Contornos para análisis de resalto hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con el análisis del resalto hidráulico se realizó la comparación descrita y los resultados se muestran en la Figura 170, se observa en los contornos extraídos que se produce claramente el resalto hidráulico ahogado con un tirante de entrada de 0.16, un tirante de salida de 4.23 m y una longitud de resalto aproximada de 19 m. También se observa que después del tirante de salida se produce una clara curva que hace tender al nivel de agua hacia el tirante normal de 5.28 m. Finalmente se puede inferir de un análisis visual de la imagen que el resalto que se produce en la modelación es muy cercano al calculado.

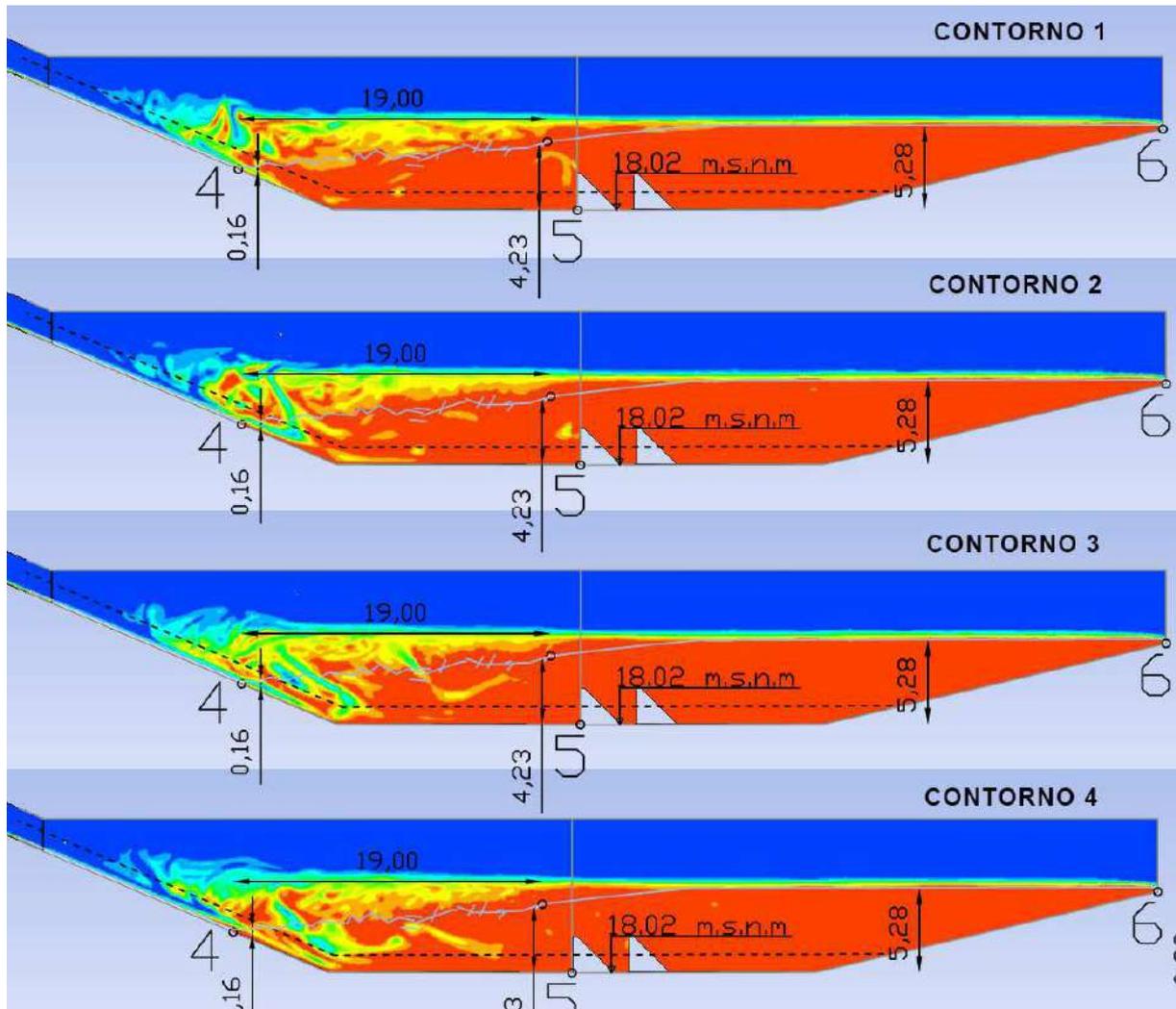


Figura 170. Comparación de resalto hidráulico con contornos.

Fuente: Elaboración propia.

De los contornos en la Figura 170 se puede observar también cierta turbulencia antes de los dados disipadores; aquí se produce cierta aireación del flujo debido a la turbulencia. Además, después de los dados disipadores y el resalto hidráulico el flujo se estabiliza alcanzando el tirante normal y no se produce aireación lo que implica que no existe turbulencia. En los contornos vemos en esta área un color rojo por debajo de la superficie libre lo que indica presencia solo de agua por lo que se eliminó la aireación y se disminuyó la turbulencia.

6.4. Velocidades

No se detallará el procedimiento para la creación de contornos ni el uso de la herramienta *Probe*, necesaria para medir el tirante, ya que se explicó en el acápite 5.2.4. Se procederá a extraer los valores de tirante y velocidades en los puntos de estudio a la largo de la rápida hidráulica detallados en la Figura 165.

1. **Punto 1:** se encuentra ubicado en la entrada de la rápida hidráulica teniendo un valor de tirante igual a 0.36 m y una velocidad superficial de 4.60 m/s. Estos datos fueron extraídos de la modelación anterior e ingresados en el CFX Pre. Se creó un contorno 5 en función del volumen de fracción de agua para verificar el tirante utilizando la herramienta *Probe*. En la Figura 171 se indica que el tirante es de 0.359, cumpliendo con el tirante de salida de la modelación anterior. Además, la Figura 172 muestra el contorno 6 en función de la velocidad de agua que va desde 0 en las paredes hasta 5 m/s aproximadamente.

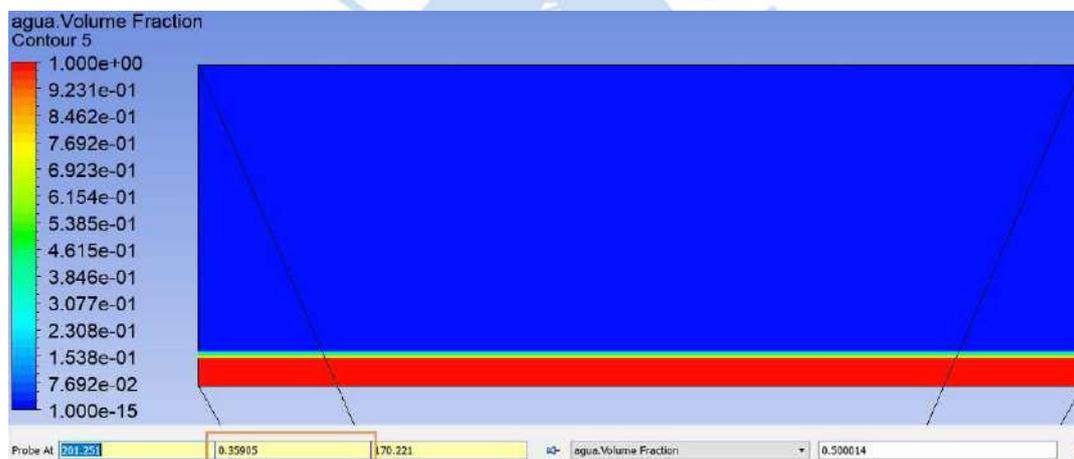


Figura 171. Contorno 5 en punto 1 de variable volumen de fracción de agua.

Fuente: Elaboración propia



Figura 172. Contorno 6 en punto 1 de variable velocidad del agua.

Fuente: Elaboración propia.

2. **Punto 2:** se encuentra ubicado al finalizar la transición de entrada a la rápida, recordemos que la sección rectangular pasa de tener 10 m de solera a 5 m en este punto. Para encontrar

el tirante y velocidad media en este punto se procederá a obtener contornos del CFX Post en función del volumen de fracción de agua y la velocidad del agua.

El primer paso es crear el plano 5 para asignarlo como ubicación de los contornos en la modelación (Figura 173).

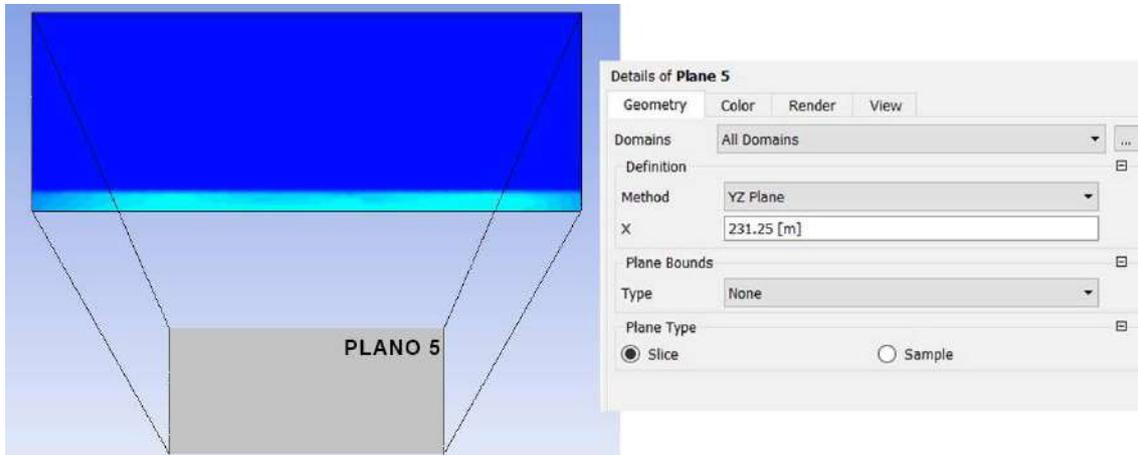


Figura 173. Creación de plano 5 en CFX Post.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con el análisis se creará en este plano los contornos mencionados. En primer lugar se creó el contorno 7 mostrado en la Figura 174, donde se obtuvo el tirante de agua cuyo valor representa la resta de -4.159 y -4.475 resultando 0.315 m.

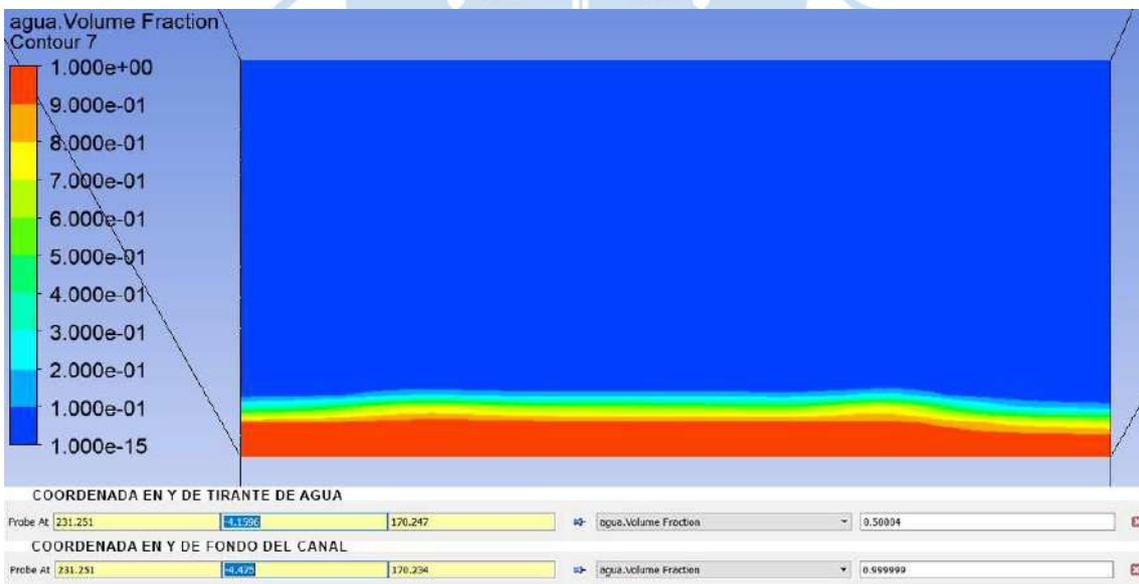


Figura 174. Contorno 7 en punto 2 de volumen de fracción de agua.

Fuente: Elaboración propia

Considerando que la velocidad media del flujo se produce a $3/5$ de la profundidad del tirante total partiendo de la superficie libre, se midió la velocidad en esta profundidad. Esta resultado con un valor de 8.935 m/s siendo muy cercana a la calculada de 9.905 m/s. Los datos se extrajeron del contorno de velocidades presentado en la Figura 175.

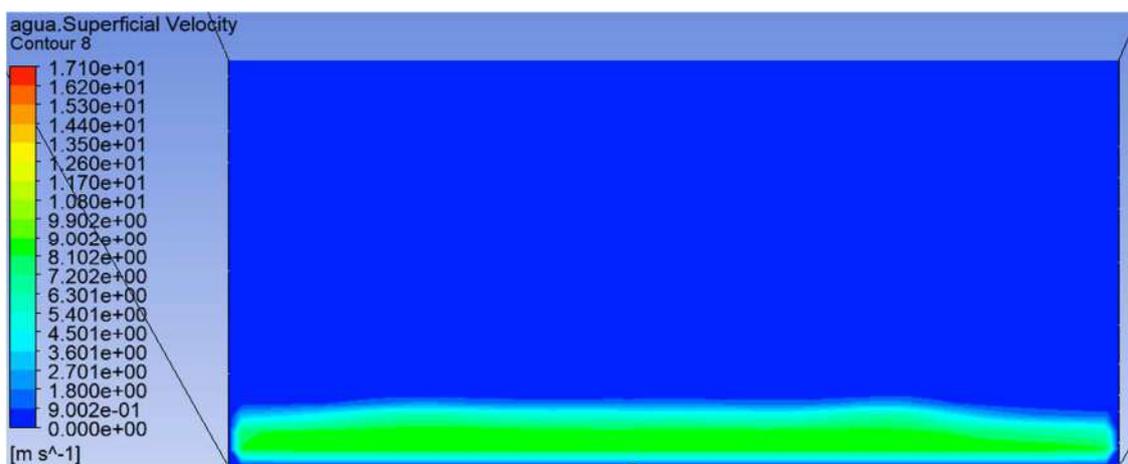


Figura 175. Contorno 8 en punto 2 de velocidad del agua.

Fuente: Elaboración propia.

3. **Punto 3:** el tercer punto de estudio se encuentra en el cambio de pendiente que se produce en el canal de la rápida. Según los cálculos se obtuvo en este punto 0.25 de tirante y 14.74 m/s de velocidad media de agua. Se procederá a crear un plano en dirección YZ con una distancia de 285.85 m en X; para posteriormente generar el contorno 9 (Figura 176)



Figura 176. Contorno 9 en punto 3 de volumen de fracción de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Se creó el contorno para obtener el tirante de la resta de las coordenadas -12.343 y -12.589 resultando 0.246 m de tirante. Este valor es muy cercano al calculado de 0.253 m. Continuando con el análisis de este punto se procedió a crear un contorno en función de la velocidad del agua (Figura 177). De este se extrajo la velocidad media del perfil encontrado, resultando 12.759 m/s. En el contorno de velocidades observamos que oscilan desde el valor 0 en paredes hasta alcanza una velocidad mayor a 12 m/s.

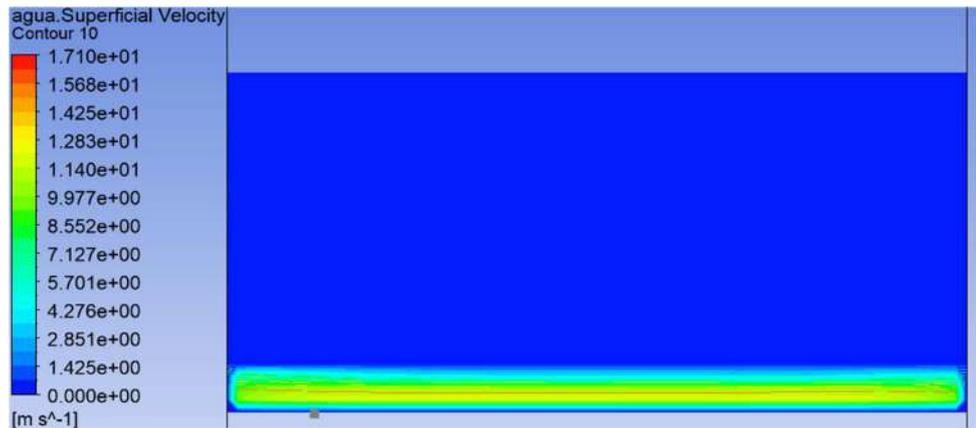


Figura 177. Contorno 10 en punto 3 de velocidad del agua.

Fuente: Elaboración propia.

4. **Punto 4 (Inicio del resalto):** este punto se encuentra ubicado en la poza disipadora justo antes de producirse el resalto hidráulico. Se generaron los contornos respectivos que nos permitieron medir el tirante de agua y velocidad (Figura 178 y Figura 179)

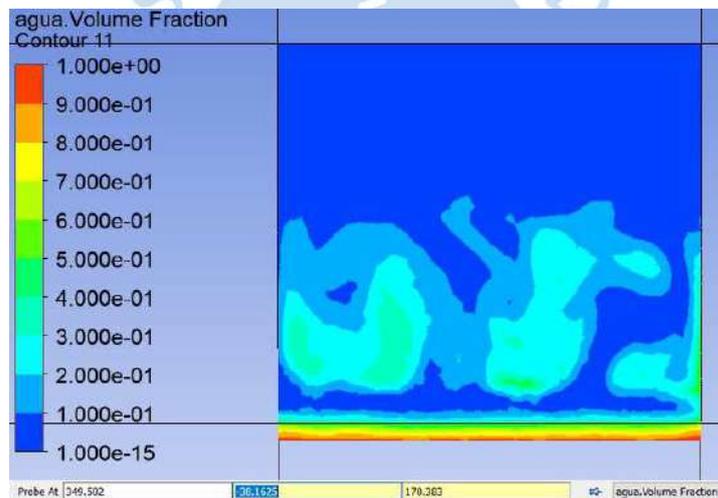


Figura 178. Contorno 11 en punto 4 de volumen de fracción de agua.

Fuente: Elaboración propia.

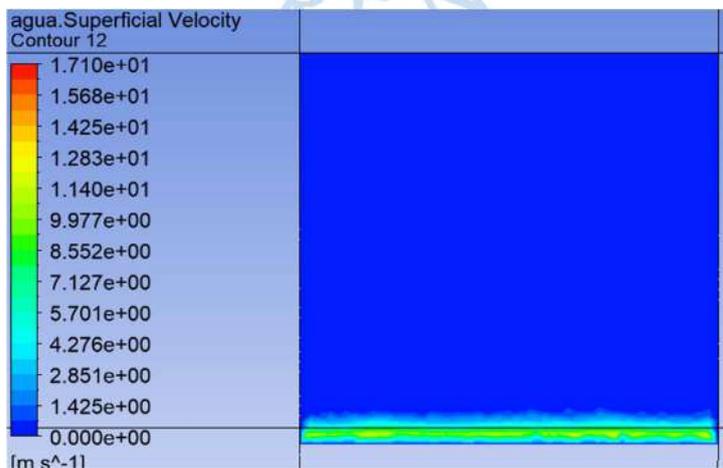


Figura 179. Contorno 12 en punto 4 de velocidad del agua.

Fuente: Elaboración propia.

En el contorno se obtuvo el tirante de agua restando las coordenadas en el eje Y: -38.163 (nivel de agua) y -38.33 (fondo del canal) resultando 0.163 m de tirante. Se obtuvo también el perfil de velocidad de agua mostrado en la Figura 179, del que se extrajo la velocidad media obteniendo un valor de 16.634 m/s.

5. **Fin del resalto hidráulico:** este punto se encuentra ubicado antes de los dados disipadores y en él se produce el tirante conjugado del resalto hidráulico. El tirante encontrado del contorno mostrado en la Figura 180 es de 5.57 m.

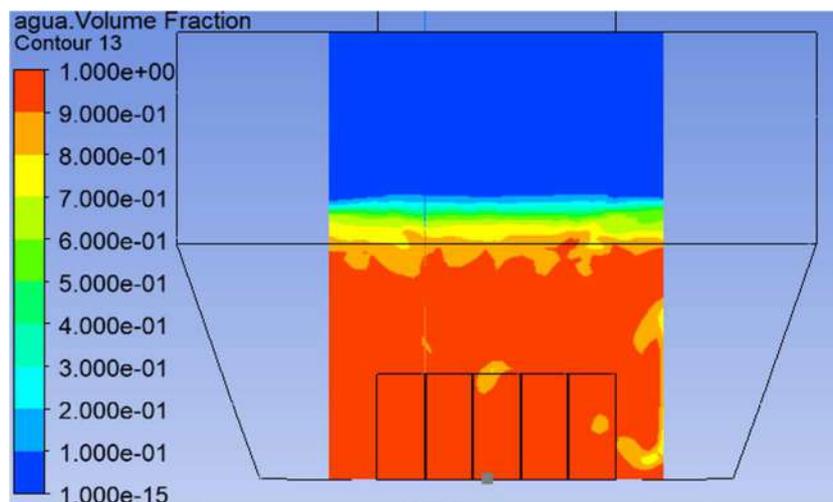


Figura 180. Contorno 13 en fin del resalto hidráulico de volumen de fracción de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo el análisis se creó un contorno en función de la variable de velocidad del agua (Figura 181). De las curvas de velocidad del contorno se puede concluir que existen velocidad entre 1 y 2 m/s en la sección; y la velocidad media es de 0.99 m/s. Por esta razón observamos que ha existido una buena disipación de energía del flujo, ya que ha disminuido considerablemente el gradiente de velocidad (Figura 179).

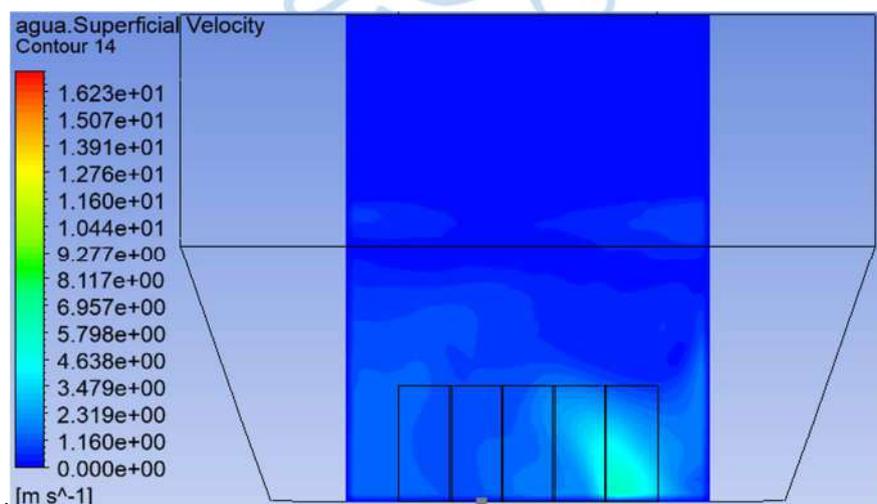


Figura 181. Contorno 14 en fin del resalto hidráulico de velocidad del agua.

Fuente: Elaboración propia.

6. **Punto 5:** este punto se encuentra ubicado en la poza disipadora cuando el flujo ya ha alcanzado el tirante normal. Se creó un plano para ubicar el contorno en la dirección YZ con una distancia de 378.5 en el eje X. En el contorno 15 de la Figura 182 se ubicó las coordenadas de la superficie libre, -37.5629, y las coordenadas del fondo del canal, -43.128. El tirante de agua resulta de la resta de estas coordenadas siendo 5.565 m, muy cercano al calculado igual de 5.28 m.

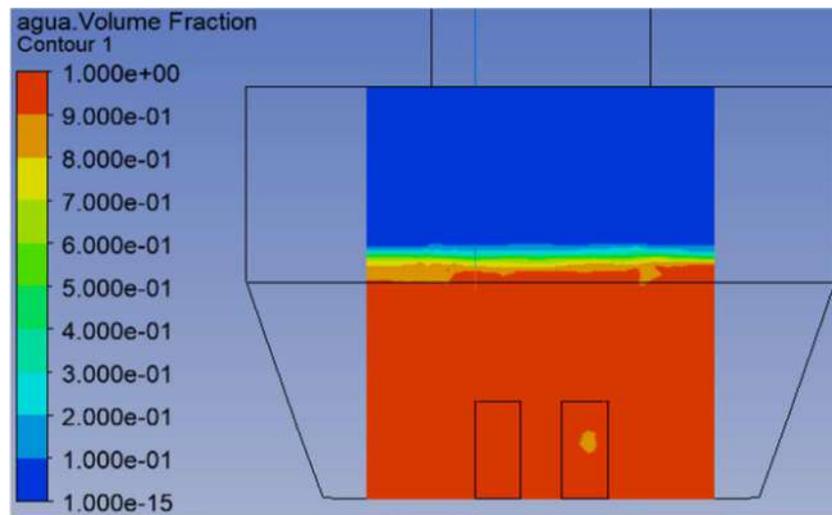


Figura 182. Contorno 15 en punto 5 de volumen de fracción de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Se creó también un contorno en función de la variable de velocidad (Figura 183), en el cual se obtuvo una velocidad media de 0.631 m/s. Este dato se extrajo de la zona alejada a los datos disipadores, como observamos en el contorno cerca a los datos el gradiente de velocidad cambia haciéndose mayor debido a la turbulencia que se ocasiona por el choque de las líneas de flujo en estos.

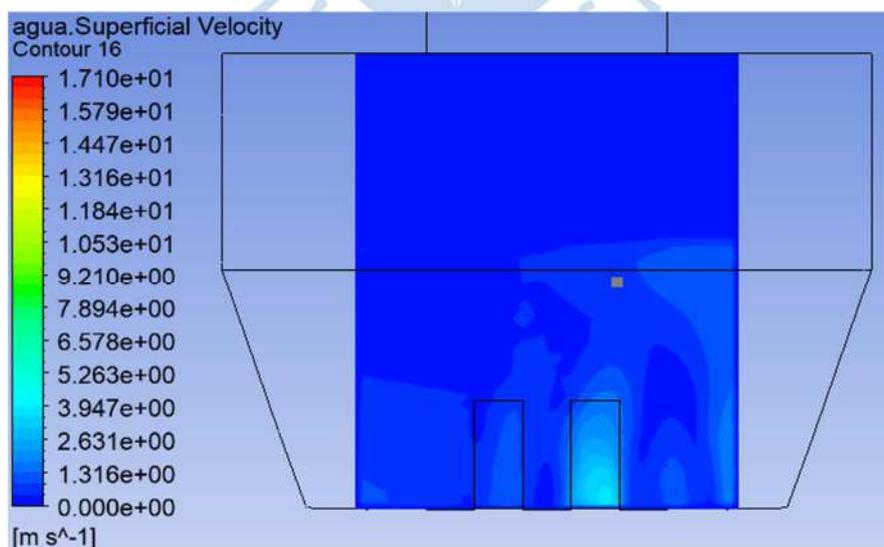


Figura 183. Contorno 16 en punto 5 de velocidad del agua.

Fuente: Elaboración propia.

7. **Punto 6:** para finalizar este punto se encuentra ubicado a la salida de la poza disipadora, se creó un contorno de volumen de fracción y de velocidad en la ubicación de la condición de frontera de salida. En el contorno 17 de la Figura 184 se ubicó las coordenadas de la superficie libre, -37.752, y las coordenadas del fondo del canal, -38.07. El tirante de agua resulta de la resta de estas coordenadas siendo 0.318 m.



Figura 184. Contorno 17 en punto 6 de volumen de fracción de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se obtuvo el contorno de velocidades del punto 6 en la Figura 185, del perfil vemos que tenemos una velocidad media de 4.276 m/s. Además, la velocidad del flujo en la salida de la rápida ha aumentado respecto a las velocidades que se produjeron después del resalto hidráulico en el centro de la poza disipadora.



Figura 185. Contorno 18 en punto 6 de velocidad del agua.

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos de los contornos se presentará un resumen en la Tabla 29. Se observa que el porcentaje de desviación respecto a los resultados obtenidos en los cálculos es bueno. Sin embargo, existen algunos valores con resultados que presentan una mayor desviación; los cuales están presentes cerca al resalto hidráulico. Esto puede deberse a la naturaleza del fenómeno.

Tabla 29. Resumen de resultados de tirantes y velocidades.

Resumen de resultados de tirantes y velocidades							
Zona	Pto	y (m)	y (m) de modelación	% error	v (m/s)	v (m/s) de modelación	% error
Transición	1	0.360	0.359	0.28%	4.626	4.600	0.56%
	2	0.376	0.315	16.31%	9.905	8.935	9.79%
Canal de la rápida hidráulica	3	0.253	0.246	2.64%	14.747	12.759	13.48%
	Inicio resalto	0.160	0.168	4.71%	23.797	16.636	30.09%
Poza disipadora	Fin del resalto	4.224	5.570	31.88%	0.902	0.990	9.71%
	5	5.282	5.565	5.36%	0.706	0.631	10.54%
	6	0.282	0.318	12.65%	4.906	4.276	12.84%

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se concluye que la configuración propuesta para el análisis rápidas hidráulicas en la sección 5.3 de esta investigación es correcta de acuerdo a la comparación de parámetros hidráulicos obtenidos de la modelación y los calculados.

6.5. Superficie libre

Finalmente, obtuvimos una isosuperficie del dominio, el procedimiento para realizarla se detalla en la Figura 138. La isosuperficie se muestra en la Figura 186, en esta observamos que el gradiente de velocidad del agua en la superficie libre varía de 0 a 18.44 m/s en todo el dominio.

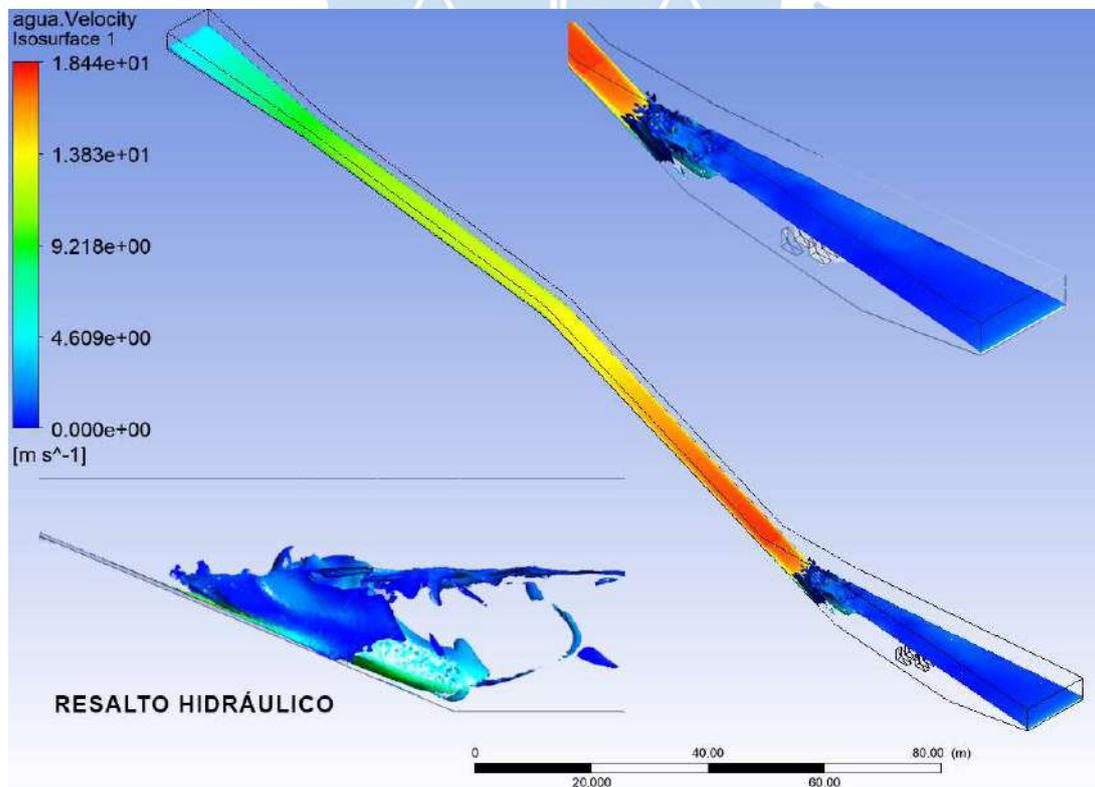


Figura 186. Isosuperficie de rápida hidráulica en función de velocidad del agua.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El presente proyecto denominado “Modelación numérica de la cámara de carga y rápida hidráulica de la central hidroeléctrica de Curumuy” tiene como objetivo principal encontrar la configuración adecuada de un modelo computacional de la rápida de Curumuy para que se tome como referencia en posteriores estudios de estructuras hidráulicas similares. A partir de los resultados obtenidos del presente trabajo se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Los gráficos de las líneas de flujo (*Streamlines*) permitieron identificar la zona donde se produce el resalto hidráulico dentro de la rápida, y los gradientes de velocidades producidos a lo largo de ésta. La eficiencia del resalto hidráulico resultó alta con un 67.88 % según los parámetros obtenidos de la modelación permitiendo disipar la energía de flujo. Se obtuvo una eficiencia alta debido a la presencia de una poza disipadora de concreto continua al resalto.
- Se observó en las líneas de corriente que en la segunda mitad de la poza disipadora cambian de flujo turbulento a laminar y en la zona de transición estas líneas aceleran gradualmente evitando la erosión en el canal.
- El tipo de resalto hidráulico observado es ahogado debido a que presenta un tirante inicial de 0.16 m, un tirante conjugado de 4.22 m y tiende a un tirante normal de 5.28 m. Los tirantes conjugados se aproximan a los calculados, teniendo una desviación porcentual de 4 en el inicio del resalto, 32 respecto al tirante conjugado y 6 respecto al tirante normal. Se considera la desviación porcentual de 32 % alta y se debe a la turbulencia presentada en esta zona del resalto hidráulico.
- Los tirantes conjugados y las velocidades del resalto llegaron a desviaciones de entre 4.71 y 32 %, debido a que es un fenómeno turbulento cuyo comportamiento es más difícil de predecir.
- En la rápida hidráulica estudiada, el mallado mixto fue la mejor opción para la configuración dentro del modelo pues permitió optimizar los recursos computacionales a través del uso de elementos hexaédricos, los cuales se colocaron en el tramo recto de la

estructura desde la transición al canal de la rápida; y elementos tetraédricos en la zona del resalto hidráulico. Así se obtuvo un mallado de buena calidad.

- Para llevar a cabo el análisis numérico de fenómenos de superficie libre, específicamente en el caso de canales de aire y agua, fue necesario definir una distribución de presión entre las fases, usando datos tomados en campo tales como: nivel de agua en la entrada del dominio y a la salida aguas abajo.
- Al realizar los aforos se presentaron ciertas limitaciones descritas anteriormente, lo que pudo influir en cierta medida en la desviación de los resultados obtenidos de la modelación y los obtenidos en los ensayos; por lo que una investigación más exhaustiva podría ser materia de otro proyecto.
- En la modelación de la cámara de carga se propuso dos tipos de análisis: estacionario con refinamiento y transitorio sin refinamiento en la superficie libre. Se obtuvieron tirantes y velocidades en coordenadas absolutas a lo largo del dominio, con desviación porcentual de 4 al 23% para el primer caso y de 2 y 18% en el segundo. Por lo que se concluye que presentan desviaciones muy cercanas, sin embargo, a partir de un análisis visual del comportamiento del flujo se vio que el análisis estacionario con refinamiento describe mejor el flujo estudiado.
- Los modelos numéricos se encuentran en fase de calibración y el presentado en esta investigación permitirá interpretar mejor los resultados necesarios para el diseño de futuras estructuras hidráulicas.

Recomendaciones

- La metodología CFD es una herramienta indispensable para el diseño de estructuras hidráulicas pues arroja resultados muy cercanos al fenómeno real. Tal y como se evidencia por la proximidad y correlación entre los parámetros hidráulicos observados y calculados. Sin embargo, es necesario contar con modelos hidráulicos a escala para poder validar los resultados obtenidos.
- En simulaciones de superficie libre es recomendable refinar el mallado en la zona límite entre las fases, o superficie libre, porque esto ha permitido mejorar la precisión de los resultados. Se puede utilizar la herramienta *mesh adaption* para análisis estacionarios o realizar una división del dominio para un posterior mallado en el caso de análisis transitorios.
- Para la mayoría de las aplicaciones de superficie libre, las condiciones iniciales pueden usar funciones escalonadas para establecer las fracciones de volumen de las fases en función de la altura. La condición inicial para la presión debe establecerse en condiciones hidrostáticas para la inicialización de la fracción de volumen especificada y la densidad de referencia de flotabilidad.
- Para realizar cualquier modelación se debe tener una buena comprensión de las propiedades físicas y las simplificaciones o idealizaciones que asume el software sobre estas propiedades. Por ejemplo, los modelos de turbulencia, los modelos multifásicos, entre otros. Todo esto debido a que no es inusual encontrar discrepancias entre el CFD y los resultados experimentales debido a que el modelo teórico asumido podría no describir adecuadamente la física del fenómeno.
- En futuras investigaciones puede mejorarse la obtención de velocidades de la estructura hidráulica utilizando nuevas tecnologías como pueden ser los perfiladores de corriente Doppler acústicos y los velocímetros Doppler acústicos. Estos proporcionan rápida y fácilmente datos tridimensionales del perfil de velocidad de la corriente, que podrían compararse con el obtenido de la modelación.

- Partiendo de la premisa de que el mallado propuesto es el correcto para los dos tipos de análisis. Cuando se decide el tipo de análisis que se utilizará, sea transitorio o estacionario, es necesario considerar el grado de precisión que necesitamos. Si bien es cierto, un análisis transitorio describe mejor fenómenos complejos en muchos casos ingenieriles basta con los resultados del análisis estacionario.



Referencias bibliográficas

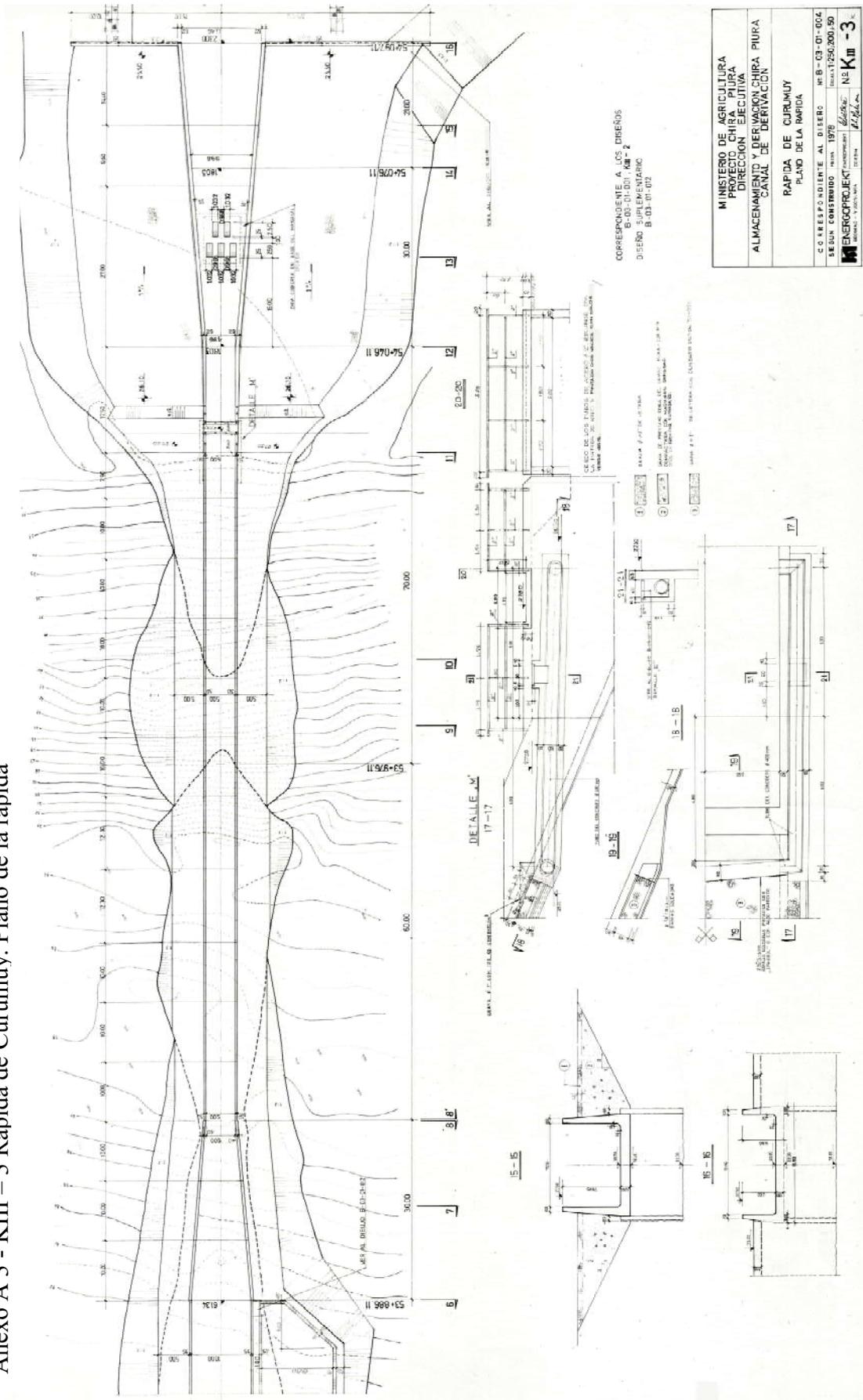
- Agencia Peruana de Noticias. (13 de Junio de 2018). Perú proyecta inversiones por más de US\$3.700M en seis centrales hidroeléctricas al 2021. Obtenido de <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/peru-proyecta-inversiones-por-mas-de-us3700m-en-seis-centrales-hidroelectricas>
- Agencia Peruana de Noticias. (22 de Abril de 2019). Perú aumenta producción eléctrica en 5,8% en marzo por mayor participación de unidades hidráulicas. Obtenido de <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/peru-aumenta-produccion-electrica-en-58-en-marzo-por-mayor-participacion-de>
- ANSYS. INC. (2015). *CFX Solver Manager User's Guide*.
- ANSYS. INC. (2015). *CFX Tutorials*.
- ANSYS. INC. (2016). *CFX Introduction*.
- ANSYS. INC. (2016). *CFX Introduction lectures trainee*.
- ANSYS. INC. (2016). *CFX Reference guide*.
- ANSYS. INC. (2016). *CFX Solver modeling guide*.
- ANSYS. INC. (2016). *CFX Solver theory guide*.
- ANSYS. INC. (2016). *CFX-Pre User's Guide*.
- ANSYS. INC. (2017). *Fluent Users Guide*.
- ANSYS. INC. (2017). *Meshing User's Guide*.
- Arteaga, F. (2017). Análisis hidráulico de la bocatoma María Auxiliadora del río Quiroz con modelo numérico tridimensional (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2013). *Guía Metodológica de Inspecciones Oculares*. Lima.
- Bentley Systems. (2007). *Computer applications in hydraulic engineering*. Pensilvania: Haestad press.
- Castillo Falcón, P. (2016). Estudio experimental y modelización numérica de flujo de canal horizontal sobre vertedero creager (Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería

- de Caminos, Canales y Puertos). Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos. Sevilla, España.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2010). *Mecánica de fluidos*. Ciudad de México: Mcgraw Hill.
- Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá: McGRAW-HILL.
- Dassault Systèmes S.A. (2010). *Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks*. Massachusetts.
- Dassault Systèmes S.A. (2015). *Introducción a SolidWorks*. Waltham.
- Dolores, J. (1992). *Centrales hidroeléctricas*. CDMX: Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- Ferziger, J., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. New York: Springer.
- French, R. (1988). *Hidráulica de canales abiertos*. Ciudad de México: Mc GRAW-HILL.
- Hirsch, C. (2007). *Numerical Computation Of Internal and External Flows*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Jaramillo, P. (2017). Evaluación del efecto de la geometría de pilares en la socavación del cauce (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú
- Juárez, K. (2016). Integración del riesgo en procedimientos de operación - mantenimiento en Central Hidroeléctrica Curumuy (Tesis para optar el título de Ingeniero Industrial y de sistemas). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Área Departamental de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Piura, Perú
- Kessler, M. (24 de Junio de 2016). *Dinámica de fluidos computacional: ¿Qué es?*. Obtenido de <https://www.esss.co/blog/es/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
- Kessler, M. (18 de octubre de 2016). *Flujo turbulento*. Obtenido de <https://www.esss.co/es/blog/flujo-turbulento/>
- Mejía, E. J., & Rosas, G. P. (2016). *Calculo de la velocidad media y el caudal con base en la velocidad superficial del agua en pequeñas corrientes*. Bogotá.
- 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 para optar el título de Ingeniero Civil). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Programa Académico de Ingeniería Civil. Quito, Ecuador.
- Moreno, J. (2016). *SOLIDWORKS 2016 Nivel básico*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Naudascher. (1994). *Hidráulica de canales abiertos. Diseño de estructuras*. México: Limusa.
- OTT MESSTECHNIK GmbH & Co. KG. (2006). *Manual de instrucciones Contador OTT Z400*. Kempten.

- OTT MESSTECHNIK GmbH. (2006). *Instrucciones de manejo. Molinete Universal C31*. Kempten.
- Palomino, J. (2003). Diseño hidráulico de una rápida para el proyecto : Construcción del canal principal de Fortaleza, distrito Congas, provincia Ocros, Región Ancash (Monografía técnica para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias físicas. Eap. de Ingeniería de Mecánica de Fluidos. Lima, Perú.
- Pardo, R., & Alegret, E. (2011). *Diseño hidráulico de aliviaderos y obras de toma para presas*. La Habana: Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría".
- Risco, R. (2009). Aplicación de la norma técnica para la coordinación de la operación en tiempo real a las centrales Curumuy y Poechos (Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Mecánico Eléctrica). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico Eléctrica. Piura, Perú.
- Rocha, A. (2003). *Los modelos como herramienta valiosa para el diseño hidráulico*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rocha, A. (2007). *Hidráulica de Canales*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sinersa Perú. (s.f.). Obtenido de <http://sinersaperu.com/nuestras-plantas/>
- SOLID-BI. (s.f.). *SOLIDWORKS. Qué es y para qué sirve*. Obtenido de <https://solid-bi.es/solidworks/>
- SolidWorks Corporation. (2005). *Conceptos básicos de SolidWorks. Piezas y ensamblajes*. Massachusetts.
- U.S. Department of the Interior, & U.S. Geological Survey. (2010). *Discharge Measurements at Gaging Stations*. Virginia.
- Versteeg, H. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Edinburgh: PEARSON.
- Villarroel, L. F. (2015). Simulación numérica de un flujo de agua a través de una válvula tipo mariposa de doble excentricidad (Tesis para optar el grado de Magíster en Ciencias con mención en Energía). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Villón, M. (2005). *Diseño de estructuras hidráulicas*. Lima: Villón.
- Villón, M. (2007). *Hidráulica de Canales*. Lima: Villón.

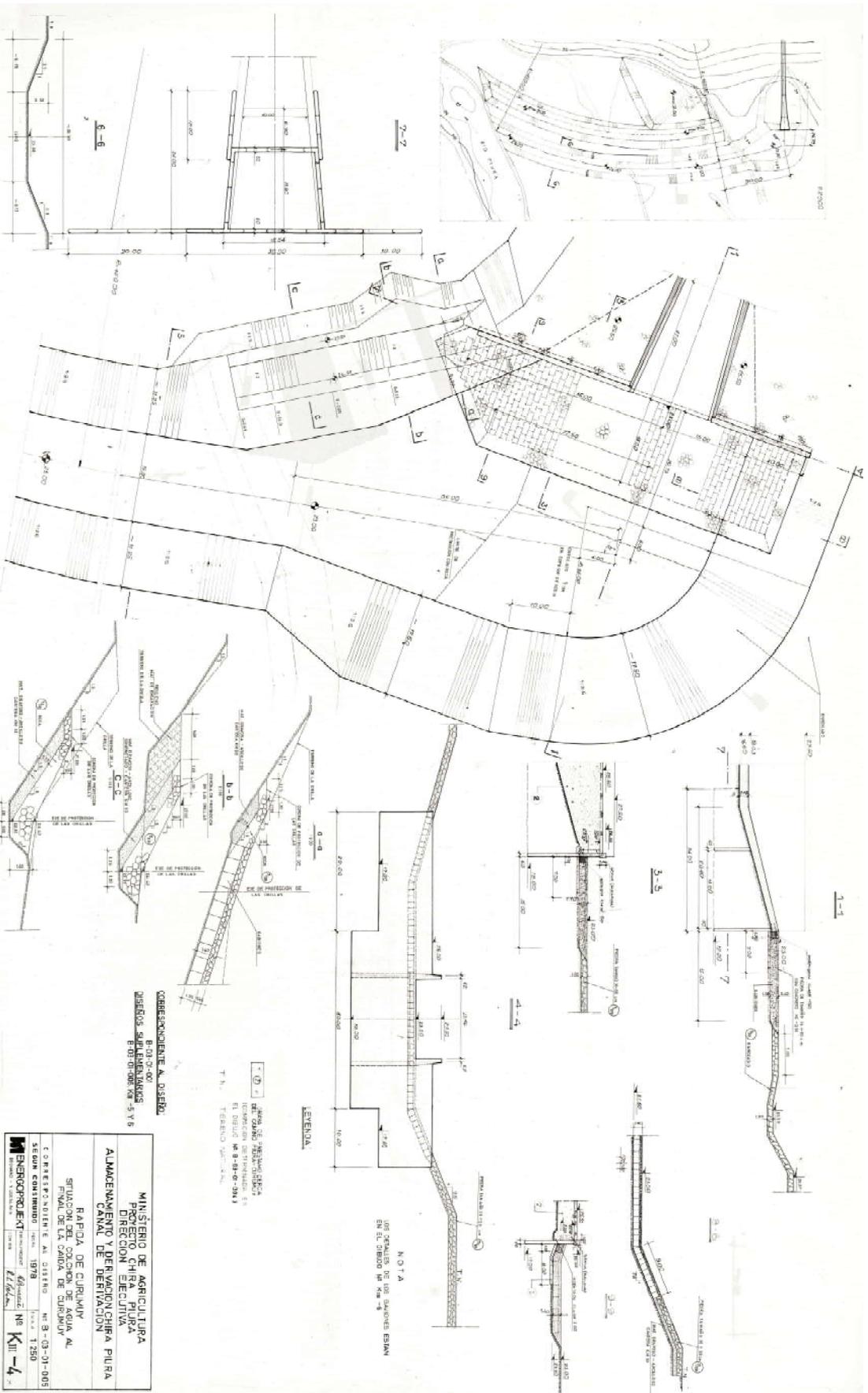


Anexo A 3 - KIII - 3 Rápida de Curumuy. Plano de la rápida



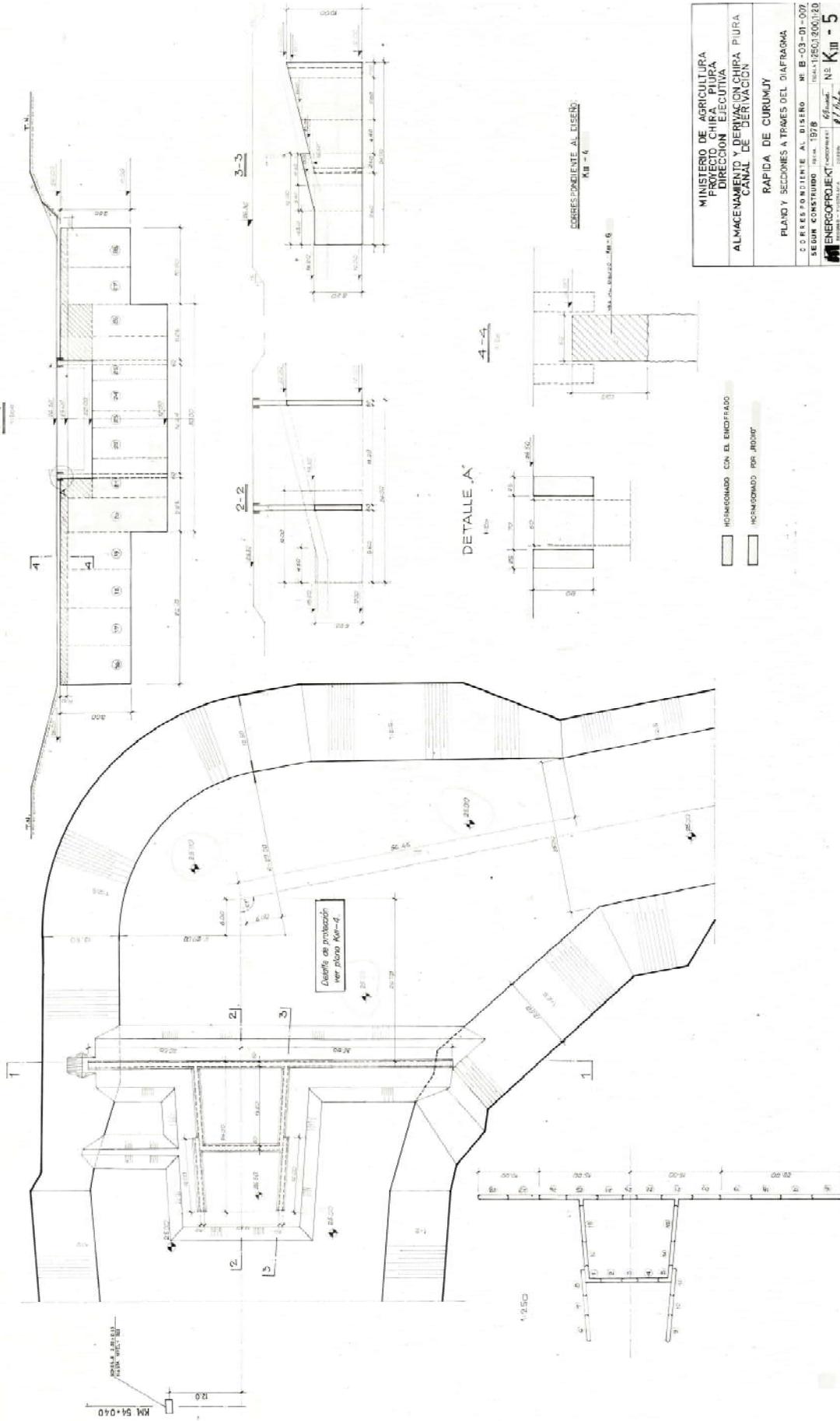
Fuente: PECH.

Anexo A 4 - KIII - 4 Rápida de Curumuy. Situación del coleccion de agua al final de la caída de Curumuy



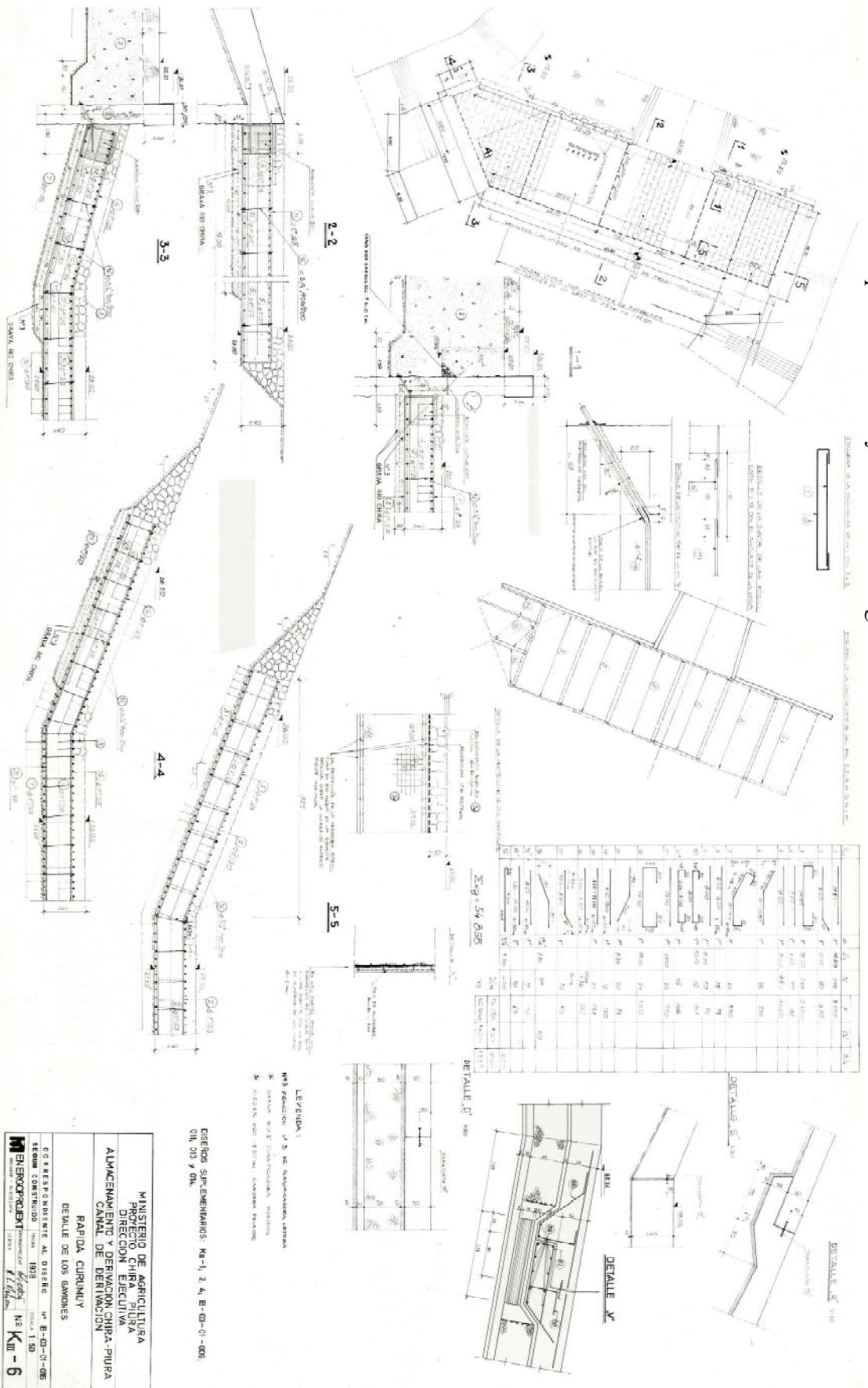
Fuente: PECH.

Anexo A 5 - KIII - 5 Rápida de Curumuy. Plano y secciones a través del diafragma

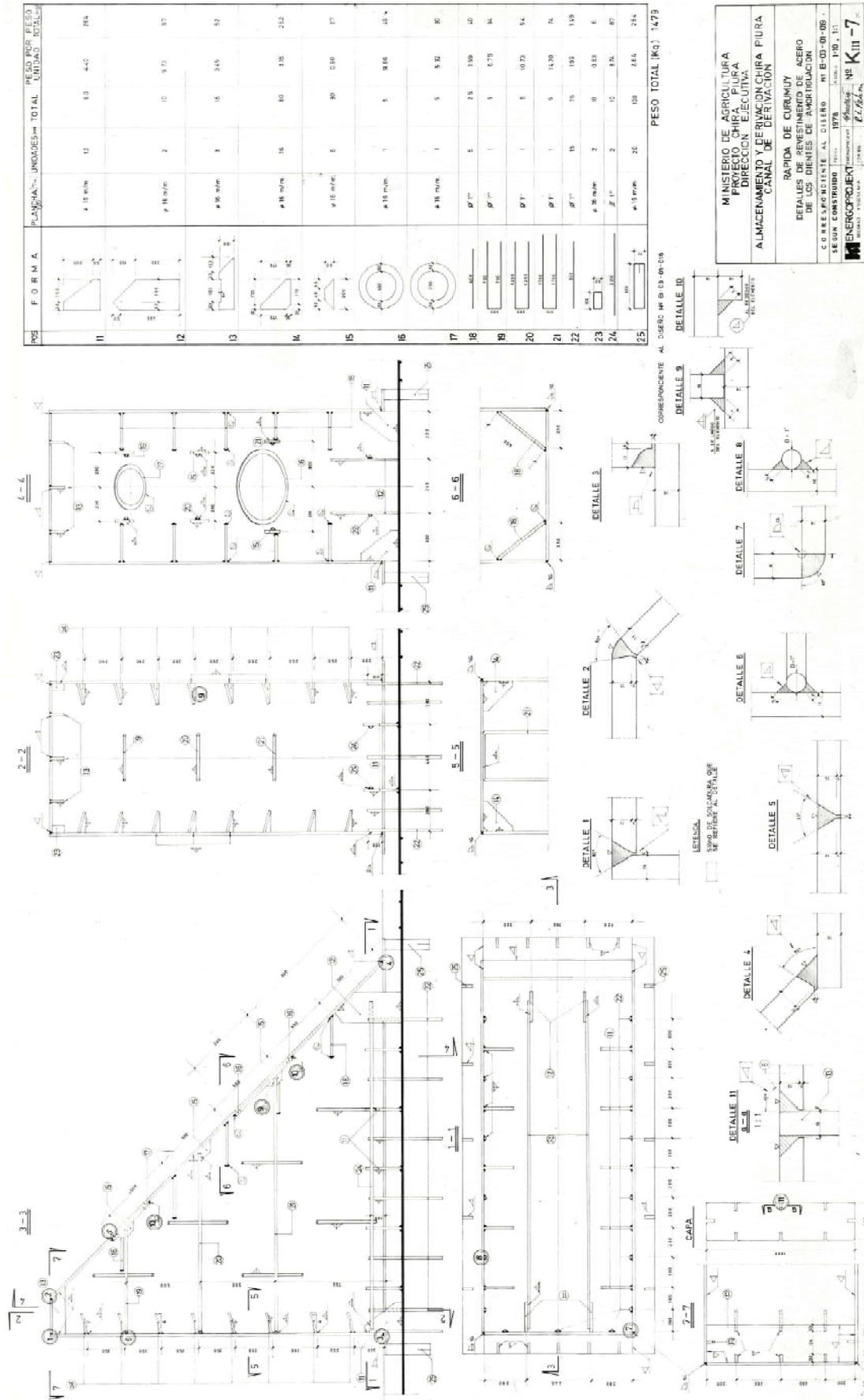


Fuente: PECH.

Anexo A 6 - KIII - 6 Rápida de Curumny. Detalle de los gaviones



Anexo A 7 - KIII - 7 Rápida de Curumuy. Detalles de revestimiento de acero de los dientes de amortiguación



MINISTERIO DE AGRICULTURA
 PROYECTO CHICA FLORA
 DIRECCION EJECUTIVA
 ALMACENAMIENTO DE REFINACION PURA
 CANAL DE DERIVACION

RAPIDA DE CURUMUY
 DETALLES DE REVESTIMIENTO DE ACERO
 DE LOS DIENTES DE AMORTIGUACION

SEGUN CONSTRUCCION N° 1378 (1964 - 1970, 11)

ENERGOPROJEK (1970) N° KIII-7

Fuente: PECH.

Anexo B - Caudal del primer aforo

	N ^o	Xi	Hi (Xi/talud)	Prof Obs (Hi*6/ 10)	Rev	n	Vel abs	Vel prom	Ancho (Xi c - Xi a)	H prom (a+4b+c)/4	Área	Q prom
TALUD	0	0.000	0.000	0.000								
	1	0.285	0.190	0.114	116	3.87	1.001	0.631	0.570	0.190	0.108	0.068
	2	0.570	0.380	0.228	128	4.27	1.104					
	3	1.070	0.713	0.428	139	4.63	1.198	1.071	1.000	0.713	0.713	0.764
	4	1.570	1.047	0.628	147	4.90	1.267					
	5	2.070	1.380	0.828	147	4.90	1.267	1.140	1.000	1.380	1.380	1.573
	6	2.570	1.713	1.028	147	4.90	1.267					
	7	3.070	2.047	1.228	139	4.63	1.198	1.135	1.000	2.047	2.047	2.323
CAJA	8	3.570	2.380	1.428	153	5.10	1.318					
	9	4.570	2.380	1.428	167	5.57	1.438	1.282	2.000	2.380	4.760	6.101
	10	5.570	2.380	1.428	176	5.87	1.516	1.356	1.000	2.380	2.380	3.228
	11	5.570	2.380	1.428	174	5.80	1.499					
	12	4.570	2.380	1.428	155	5.17	1.335	1.174	2.000	2.380	4.760	5.586
	13	3.570	2.380	1.428	125	4.17	1.078					
TALUD	14	3.070	2.047	1.228	122	4.07	1.052	0.944	1.000	2.047	2.047	1.933
	15	2.570	1.713	1.028	118	3.93	1.018					
	16	2.070	1.380	0.828	116	3.87	1.001	0.908	1.000	1.380	1.380	1.253
	17	1.570	1.047	0.628	117	3.90	1.009					
	18	1.070	0.713	0.428	111	3.70	0.958	0.839	1.000	0.713	0.713	0.598
	19	0.570	0.380	0.228	96	3.20	0.829					
	20	0.285	0.190	0.114	85	2.83	0.735	0.469	0.570	0.190	0.108	0.051
		0.000	0.000	0.000								
Total											20.39 7	23.479

Fuente: Elaboración propia.

Anexo C – Tabla densidad del aire a presión atmosférica

Temp.	Densidad	Calor específico	Conductividad térmica	Difusividad térmica	Viscosidad dinámica	Viscosidad cinemática	Número de Prandtl
T, °C	ρ , kg/m ³	C_p , J/kg·K	k, W/m·K	α , m ² /s	μ , kg/m·s	ν , m ² /s	Pr
-150	2,866	983	0,01171	$4,158 \times 10^{-6}$	$8,636 \times 10^{-6}$	$3,013 \times 10^{-6}$	0,7246
-100	2,038	966	0,01582	$8,036 \times 10^{-6}$	$1,189 \times 10^{-6}$	$5,837 \times 10^{-6}$	0,7263
-50	1,582	999	0,01979	$1,525 \times 10^{-5}$	$1,474 \times 10^{-5}$	$9,319 \times 10^{-6}$	0,7440
-40	1,514	1002	0,02057	$1,356 \times 10^{-5}$	$1,527 \times 10^{-5}$	$1,008 \times 10^{-5}$	0,7436
-30	1,451	1004	0,02134	$1,465 \times 10^{-5}$	$1,579 \times 10^{-5}$	$1,087 \times 10^{-5}$	0,7425
-20	1,394	1005	0,02211	$1,578 \times 10^{-5}$	$1,630 \times 10^{-5}$	$1,169 \times 10^{-5}$	0,7408
-10	1,341	1006	0,02288	$1,696 \times 10^{-5}$	$1,680 \times 10^{-5}$	$1,252 \times 10^{-5}$	0,7387
0	1,292	1006	0,02364	$1,818 \times 10^{-5}$	$1,729 \times 10^{-5}$	$1,338 \times 10^{-5}$	0,7362
5	1,269	1006	0,02401	$1,880 \times 10^{-5}$	$1,754 \times 10^{-5}$	$1,382 \times 10^{-5}$	0,7350
10	1,246	1006	0,02439	$1,944 \times 10^{-5}$	$1,778 \times 10^{-5}$	$1,426 \times 10^{-5}$	0,7336
15	1,225	1007	0,02476	$2,009 \times 10^{-5}$	$1,802 \times 10^{-5}$	$1,470 \times 10^{-5}$	0,7323
20	1,204	1007	0,02514	$2,074 \times 10^{-5}$	$1,825 \times 10^{-5}$	$1,516 \times 10^{-5}$	0,7309
25	1,184	1007	0,02551	$2,141 \times 10^{-5}$	$1,849 \times 10^{-5}$	$1,562 \times 10^{-5}$	0,7296
30	1,164	1007	0,02588	$2,208 \times 10^{-5}$	$1,872 \times 10^{-5}$	$1,608 \times 10^{-5}$	0,7282
35	1,145	1007	0,02625	$2,277 \times 10^{-5}$	$1,895 \times 10^{-5}$	$1,655 \times 10^{-5}$	0,7268
40	1,127	1007	0,02662	$2,346 \times 10^{-5}$	$1,918 \times 10^{-5}$	$1,702 \times 10^{-5}$	0,7255
45	1,109	1007	0,02699	$2,416 \times 10^{-5}$	$1,941 \times 10^{-5}$	$1,750 \times 10^{-5}$	0,7241
50	1,092	1007	0,02735	$2,487 \times 10^{-5}$	$1,963 \times 10^{-5}$	$1,798 \times 10^{-5}$	0,7228
60	1,059	1007	0,02808	$2,632 \times 10^{-5}$	$2,008 \times 10^{-5}$	$1,896 \times 10^{-5}$	0,7202
70	1,028	1007	0,02881	$2,780 \times 10^{-5}$	$2,052 \times 10^{-5}$	$1,995 \times 10^{-5}$	0,7177
80	0,9994	1008	0,02953	$2,931 \times 10^{-5}$	$2,096 \times 10^{-5}$	$2,097 \times 10^{-5}$	0,7154
90	0,9718	1008	0,03024	$3,086 \times 10^{-5}$	$2,139 \times 10^{-5}$	$2,201 \times 10^{-5}$	0,7132
100	0,9458	1009	0,03095	$3,243 \times 10^{-5}$	$2,181 \times 10^{-5}$	$2,306 \times 10^{-5}$	0,7111
120	0,8977	1011	0,03235	$3,565 \times 10^{-5}$	$2,264 \times 10^{-5}$	$2,522 \times 10^{-5}$	0,7073
140	0,8542	1013	0,03374	$3,898 \times 10^{-5}$	$2,345 \times 10^{-5}$	$2,745 \times 10^{-5}$	0,7041
160	0,8148	1016	0,03511	$4,241 \times 10^{-5}$	$2,420 \times 10^{-5}$	$2,975 \times 10^{-5}$	0,7014
180	0,7788	1019	0,03646	$4,593 \times 10^{-5}$	$2,504 \times 10^{-5}$	$3,212 \times 10^{-5}$	0,6992
200	0,7459	1023	0,03779	$4,954 \times 10^{-5}$	$2,577 \times 10^{-5}$	$3,455 \times 10^{-5}$	0,6974
250	0,6746	1033	0,04104	$5,890 \times 10^{-5}$	$2,760 \times 10^{-5}$	$4,091 \times 10^{-5}$	0,6946
300	0,6158	1044	0,04418	$6,871 \times 10^{-5}$	$2,934 \times 10^{-5}$	$4,765 \times 10^{-5}$	0,6935
350	0,5664	1056	0,04721	$7,892 \times 10^{-5}$	$3,101 \times 10^{-5}$	$5,475 \times 10^{-5}$	0,6937
400	0,5243	1069	0,05015	$8,951 \times 10^{-5}$	$3,261 \times 10^{-5}$	$6,219 \times 10^{-5}$	0,6948
450	0,4880	1081	0,05298	$1,004 \times 10^{-4}$	$3,415 \times 10^{-5}$	$6,997 \times 10^{-5}$	0,6965
500	0,4565	1093	0,05572	$1,117 \times 10^{-4}$	$3,563 \times 10^{-5}$	$7,806 \times 10^{-5}$	0,6986
600	0,4042	1115	0,06093	$1,352 \times 10^{-4}$	$3,846 \times 10^{-5}$	$9,515 \times 10^{-5}$	0,7037
700	0,3627	1135	0,06581	$1,598 \times 10^{-4}$	$4,111 \times 10^{-5}$	$1,133 \times 10^{-4}$	0,7092
800	0,3289	1153	0,07037	$1,855 \times 10^{-4}$	$4,362 \times 10^{-5}$	$1,326 \times 10^{-4}$	0,7149
900	0,3008	1169	0,07465	$2,122 \times 10^{-4}$	$4,600 \times 10^{-5}$	$1,529 \times 10^{-4}$	0,7206
1000	0,2772	1184	0,07868	$2,398 \times 10^{-4}$	$4,826 \times 10^{-5}$	$1,741 \times 10^{-4}$	0,7260
1500	0,1990	1234	0,09599	$3,908 \times 10^{-4}$	$5,817 \times 10^{-5}$	$2,922 \times 10^{-4}$	0,7478
2000	0,1553	1264	0,11113	$5,664 \times 10^{-4}$	$6,630 \times 10^{-5}$	$4,270 \times 10^{-4}$	0,7539

Fuente: Cengel & Cimbala, 2010.

Anexo D - Tabla de propiedades del agua

Temp.	Presión de saturación	Densidad		Entalpía de vaporización
		ρ , kg/m ³		
T, °C	P _{sat} kPa	Líquido	Vapor	h _{fg} , kJ/kg
0,01	0,6113	999,8	0,0048	2501
5	0,8721	999,9	0,0068	2490
10	1,2276	999,7	0,0094	2478
15	1,7051	999,1	0,0128	2466
20	2,339	998,0	0,0173	2454
25	3,169	997,0	0,0231	2442
30	4,246	996,0	0,0304	2431
35	5,628	994,0	0,0397	2419
40	7,384	992,1	0,0512	2407
45	9,593	990,1	0,0655	2395
50	12,35	988,1	0,0831	2383
55	15,76	985,2	0,1045	2371
60	19,94	983,3	0,1304	2359
65	25,03	980,4	0,1614	2346
70	31,19	977,5	0,1983	2334
75	38,58	974,7	0,2421	2321
80	47,39	971,8	0,2935	2309
85	57,83	968,1	0,3536	2296
90	70,14	965,3	0,4235	2283
95	84,55	961,5	0,5045	2270
100	101,33	957,9	0,5978	2257
110	143,27	950,6	0,8263	2230
120	198,53	943,4	1,121	2203
130	270,1	934,6	1,496	2174
140	361,3	921,7	1,965	2145
150	475,8	916,6	2,546	2114
160	617,8	907,4	3,256	2083
170	791,7	897,7	4,119	2050
180	1002,1	887,3	5,153	2015
190	1254,4	876,4	6,388	1979
200	1553,8	864,3	7,852	1941
220	2318	840,3	11,60	1859
240	3344	813,7	16,73	1767
260	4688	783,7	23,69	1663
280	6412	750,8	33,15	1544
300	8581	713,8	46,15	1405
320	11274	667,1	64,57	1239
340	14586	610,5	92,62	1028
360	18651	528,3	144,0	720
374,14	22090	317,0	317,0	0

Fuente: Cengel & Cimbala, 2010.

Anexo E - Tabla de coeficientes de Manning y absolutos de materiales

Material	Coef. Manning	Coef. Hazen-Williams	Coef. Rugosidad
Asbesto	0.011	140	0.0015
Latón	0.011	135	0.0015
Tabique	0.015	100	0.6
Fierro fundido (nuevo)	0.012	130	0.26
Concreto (cimbra metálica)	0.011	140	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.015	120	0.6
Concreto Simple	0.013	135	0.36
Cobre	0.011	135	0.0015
Acero corrugado	0.022	--	45
Acero galvanizado	0.016	120	0.15
Acero (esmaltado)	0.01	148	0.0048
Acero (nuevo, sin recubrimiento)	0.011	145	0.045
Acero (remachado)	0.019	110	0.9
Plomo	0.011	135	0.0015
Plástico (PVC)	0.009	150	0.0015
Madera (duelas)	0.012	120	0.18
Vidrio (laboratorio)	0.011	140	0.0015

Fuente: Bentley Systems, 2007.